

# В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC  
AMERICAN

*Издание на русском языке*



*Январь* **1** 1983

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ



**В МИРЕ НАУКИ** — это ответ на все возрастающую потребность быть в курсе самых последних научных достижений, потребность, которую вместе с вами испытывают все больше людей во всем мире. Наука изменяет нашу жизнь; опираясь на добытые ею знания, мы обретаем новое понимание мира и самих себя, и одновременно. — новые возможности преобразования мира на благо человека.

*В мире науки* — как издание журнала *Сайентифик Америкн* на русском языке — международный журнал. В нем вы найдете статьи о последних достижениях во всех областях науки, написанные учеными из разных стран мира, в том числе и из СССР. Авторы статей разделяют убеждение редакции *Сайентифик Америкн*, что жизнь науки должна быть понятной как можно более широкому читателю. Совместными усилиями мы стараемся излагать научные идеи в доступной форме. Редакторы нашего журнала работают над статьями вместе с их авторами, обсуждая текст и подбирая иллюстрации, которые несут значительную долю смысловой нагрузки. Тем самым мы стремимся дать читателю представление о достижениях даже в узкоспециализированных областях науки.

Благодаря такому сотрудничеству ученых и редакторов всемирный тираж журнала, издающегося на семи языках (английском, французском, немецком, итальянском, испанском, японском и китайском), превысил один миллион экземпляров. В свете необходимости улучшения взаимопонимания между народами, мы рады тому, что к растущей армии наших читателей, серьезно и активно интересующихся наукой, теперь присоединяются и советские читатели. От имени всех редакторов международной сети журнала *Сайентифик Америкн* я имею честь заявить, что мы гордимся возможностью служить своим новым друзьям в Советском Союзе и будем стремиться как можно лучше учитывать ваши интересы.

*Gerard Piel*

Джерард Пил

ИЗДАТЕЛЬ САЙЕНТИФИК АМЕРИКН



**НАУКА В** современном **МИРЕ**, выступая в качестве главной движущей и производительной силы НТР, является и неотъемлемой составляющей мировой культуры. Поэтому информация о прогрессе науки и техники, популяризация знаний и пропаганда научных представлений о мире способствуют формированию научного мировоззрения.

Обмен научными идеями, будучи составной частью международного сотрудничества, в свою очередь стимулирует его поступательное движение. Современное понятие «взаимозависимости» между странами в значительной мере применимо и к развитию науки и техники. Передовые ученые различных стран отстаивают необходимость и пользу сотрудничества во имя мира и социального прогресса.

Перевод на русский язык *Сайентифик Америкн* и его издание в СССР приобретают значимость именно сейчас, когда наблюдается ограничение международного сотрудничества во многих областях.

Говоря о том, что человечество живет в «золотом» веке науки и что нет пределов научным открытиям в будущем, следует помнить и о возросшей ответственности ученых за будущее нашей планеты. Глобальные проблемы современности требуют объединения усилий различных стран и народов, в том числе и в области науки. Это — проблемы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды, проблемы современной энергетики, мирного использования Мирового океана и космического пространства, ликвидации неграмотности, голода и болезней. В этой связи международное сотрудничество ученых различных стран призвано сыграть огромную роль в решении главных проблем, стоящих перед человечеством.

Советские ученые всегда стремились к развитию научных контактов с учеными других стран и готовы объединить свои усилия со всеми, кто выступает за мир, разрядку и плодотворное международное сотрудничество.

Е. П. Велихов

ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ АН СССР

## ОТ РЕДАКЦИИ

**Н**АСТОЯЩИМ выпуском «В мире науки» начинается издание перевода американского журнала «Сайентифик Америкн» на русский язык. Первые два номера будут содержать материалы, опубликованные в оригинале в 1982 г., с мартовского номера журнала мы планируем систематический перевод «Сайентифик Америкн» выпуска 1983 г.

Журнал «Сайентифик Америкн», издаваемый в США с 1845 г., является одним из наиболее авторитетных научно-популярных журналов. За последние 30 лет, когда его издателем стал Джерард Пил, этот журнал заметно преобразился. По существу из американского издания он превратился в международное, освещающее прогресс всей мировой науки. В основном журнал посвящен естественным дисциплинам. Кроме того, в нем широко представлены статьи по новой технике, истории науки, археологии. Специальные рубрики — «Магия математики», «Наука вокруг нас», «50 и 100 лет назад» представляют материалы об удивительных явлениях в окружающем нас мире, интересные факты из истории научных открытий, опубликованные на страницах журнала в конце прошлого и начале нашего столетия, и т.д.

«Сайентифик Америкн» хорошо знаком советскому читателю, и не только в оригинале, но и в виде репродуцированного издания. Переводы из него по физике и астрономии регулярно печатались в советском журнале «Успехи физических наук», отдельными сборниками выходили тематические спецвыпуски, например «Молекулы и клетки», «Мозг» и т.д. Любителям математики знакомы книги Мартина Гарднера, написанные на основе его статей, публиковавшихся на протяжении многих лет в «Сайентифик Америкн».

В русском переводе журнал будет выходить практически полностью, однако, как и другие переводные издания «Сайентифик Америкн», выпускаемые во Франции, ФРГ, Италии, Испании, Японии и КНР, мы имеем право по согласованию с американской редакцией заменить любую статью номера, не представляющую всеобщего интереса, статьей советского автора либо оригинальной статьей, напечатанной в одном из шести зарубежных изданий журнала.

Нашему читателю, несомненно, будет

интересна рубрика, посвященная обзору новых книг. На протяжении многих лет ее ведет известный американский физик, профессор Гарвардского университета Филип Моррисон. Один из непосредственных участников создания атомной бомбы, после трагедии Хиросимы и Нагасаки Моррисон отошел от военных исследований и много сделал для разъяснения опасности атомной войны. Моррисон обладает поистине энциклопедическими познаниями, и его рецензии всегда отличает широкий взгляд на предмет, часто сопровождаемый анализом исторических и социальных последствий научных открытий и исследований.

В известной мере этим же вопросам посвящена главная информационная рубрика журнала «Наука и общество».

В ряде случаев публикуемые статьи отражают субъективное мнение их авторов, которое может не совпадать с точкой зрения советских ученых и редакции русского издания, однако представляется нужным дать возможность нашему читателю ознакомиться с теми различными, иногда противоречивыми точками зрения, которые возникают в оценках роли науки. Следует подчеркнуть, что в освещении вопросов применения науки в военных целях, в вопросах гонки вооружений и ядерного оружия в особенности, журнал «Сайентифик Америкн» занимает последовательную антимилитаристскую позицию. Джерард Пил принимает участие в Пагуошском движении ученых и выступает за развитие международного сотрудничества в науке. Его деятельность как публициста и популяризатора науки была отмечена в 1962 г. международной премией Калинги, присуждаемой ЮНЕСКО.

Предпринимая настоящее издание, редакция журнала осознает те трудности, которые предстоит преодолеть как при переводе, так и при восприятии многих материалов. Всякое вторичное, — а популярное издание, как и учебник, не есть первичное изложение науки, — всегда ориентировано на определенную аудиторию, выделенную не только языком, но и системой образования, привычных образов и путей восприятия. Представля советскому читателю этот журнал, мы надеемся на понимание имеющихся трудностей, к преодолению которых редакция приложит все доступные ей средства.

ПРОФЕССОР С. П. Капица  
ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

# 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

№1 · ЯНВАРЬ 1983

*В номере:*

- СТАТЬИ**
- 8 Квazarы—зонды удаленных областей и ранних стадий нашей Вселенной *Патрик С.Озмер*  
Свет от этих загадочных объектов был испущен 15 млрд. лет назад, поэтому они предоставляют нам уникальный ключ к разгадке того, как выглядела Вселенная тогда, когда она была в четыре раза моложе, чем сегодня  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 2)
- 16 Суперкомпьютеры *Рональд Д.Левин*  
Компьютеры Cray-1 и CYBER-205 могут выполнять до 100 млн. арифметических операций в секунду. Столь невероятная скорость обработки числовой информации необходима для решения очень сложных задач, как, например, задачи гидродинамики  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 1)
- 36 Лазеры в промышленности *Альдо В.Ла Рокка*  
Лазерные установки широко применяются для сверления, резки, сварки, закалки и легирования материалов. Их уникальные возможности требуют нового подхода к самому изделию и процессу его изготовления  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 3)
- 48 Массовые вымирания позднего мезозоя *Дейл А.Рассел*  
Много видов растений и животных, особенно динозавров, вымерли внезапно около 63 млн. лет назад. Тонкий слой осадков, обогащенных иридием, подтверждает, что причиной этому может быть падение астероида  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 1)
- 56 Регенерация растений картофеля из протопластов клеток листа *Джеймс Ф.Шепард*  
При новом подходе в клонировании, или бесполом размножении растений, исходным материалом служат живые клетки, с которых удалили их наружную оболочку. Этим методом удается получать новые разновидности растений и повышать урожайность сельскохозяйственных культур  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 5)
- 64 Онкогены *Дж.Майкл Бишоп*  
Это гены, вызывающие рак. Впервые их нашли у вирусов, но история эволюции заставляет полагать, что и в нормальных клетках позвоночных животных есть гены, аномальная экспрессия которых может привести к злокачественному росту  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 3)
- 75 Древний греческий город в Центральной Азии *Поль Бернар*  
Завоевание Персии Александром Македонским привело к возникновению на территории нынешнего Афганистана греческого государства. Последние 15 лет французская археологическая экспедиция вела раскопки Ай-Ханума, одного из городов этого государства  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 1)
- 84 Короткая жизнь Эвариста Галуа *Тони Ротман*  
Согласно легенде, молодой математик описал теорию групп в ночь накануне дуэли, на которой он был смертельно ранен. Более тщательные исследования показывают, что формирование замечательных идей Галуа заняло несколько больше времени  
(Scientific American, 1982, т. 246, № 4)
- РУБРИКИ**
- 5 Об авторах
- 29 Магия математики
- 35 50 и 100 лет назад
- 44 Наука и общество
- 93 101 Книги
- 96 Наука вокруг нас
- 104 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.

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

## В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА  
Л. В. Шепелова

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ  
Т. А. Румянцова  
О. К. Кудрявов  
З. Е. Кожанова

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

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР  
Н. М. Козлов

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР  
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР  
И. И. Дериколенко

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

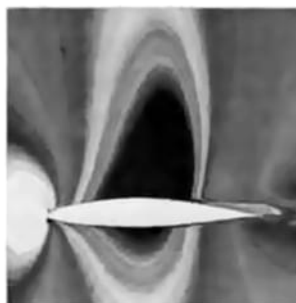
ТИТУЛЬНАЯ НАДПИСЬ,  
ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ:  
В. В. Ефимов

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

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ  
286.2588

© Составление, перевод  
на русский язык, оформление:  
издательство «Мир», 1983

## На обложке



## СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ

Рисунок на обложке — один из кадров фильма, в котором представлен поток, обтекающий профиль крыла со скоростью 0,7 М (т.е. 0,7 скорости звука). Этот фильм был получен в результате моделирования на суперкомпьютере ILLIAC IV (см. статью Рональда Д. Леваяна «Суперкомпьютеры», с. 16). Моделирование входило в программу численного исследования флаттера элерона, проводимую исследовательским центром Национального управления по авиации и исследованию космического пространства в Мофет-Филд, шт. Калифорния. Понятие флаттера означает вибрацию, которая может достигать разрушительной силы. В частности, флаттер элерона может возникнуть в том случае, когда ударная волна, появляющаяся при обтекании профиля крыла, действует на элерон — расположенную на задней кромке крыла рулевую поверхность. Численные значения изменения плотности воздуха были получены при помощи сетки примерно из 7000 узлов, повторяющей конфигурацию профиля крыла. Узлы сетки распределялись неравномерно: довольно редко — в области передней кромки крыла, и близко друг к другу — в исследуемой области задней кромки. Для получения одного кадра требовалось 40 млн. арифметических операций (т.е. 2 секунды машинного времени на ILLIAC IV). Кривые одинаковой плотности окрашены одним цветом. Темно-желтый цвет соответствует плотности воздуха в состоянии покоя: более светлые тона указывают на сжатие, более темные — на разрежение. Там, где окраска резко меняется (треть расстояния от задней кромки крыла), и находится ударная волна. Под ее действием воздушный поток отрывается вблизи задней кромки крыла, образуя область возвратного течения (*фиолетовый цвет*). Расчеты проводил Г. Бейли; программу для получения графических изображений написали Т. Хасигави и Э. Джонсон.

## Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration

СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК
7 Malcolm G. Smith, Royal Observatory (Edinburgh)	39 Avco Everett Research Laboratory, Inc.	67, 68 Bunji Tagawa
8-10 Alan D. Iselin	40, 41 R.T.M. Institute	69 Mark C. Willingham and Ira H. Pastan (вверху), Larry R. Rohrschneider (внизу)
11 Cerro Tololo, Inter-American Observatory	42 United Technologies Research Center	70 Bunji Tagawa
12 © 1960 National Geographic Society-Palomar Sky Survey, воспроизводится с разрешения California Institute of Technology (вверху)	43 General Motors Corporation	71 J. Michael Bishop (вверху), Bunji Tagawa (внизу)
13-15 Alan D. Iselin (внизу)	47 Brian J. Ford	72, 73 Bunji Tagawa
17 Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration	49 Walter Alvarez	76-78 Délégation Archéologique Française en Afghanistan
18, 19 Jon Brenneis	50 Helen V. Michel (вверху)	79-81 Andrew Tomko
20-25, 27 Allen Beechel	50 D. M. Jarzen (внизу)	82, 83 Délégation Archéologique Française en Afghanistan
28 Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration	51-54 Patricia J. Wynne	85 David A. Johnson
29-33 Albert E. Miller	57 James F. Shepard Kansas State University	86, 92 Jean Dubout, с любезного разрешения Bibliothèque de l'Institut de France (Paris)
37 Fiat Auto S.p.A.	58 Patricia J. Wynne	87-90 Ilil Arbel
38 Ian Worpole	59, 60 James F. Shepard, Kansas State University	97 Marshall Harrington Photography
	61 Bikrum S. Gill and Lauren Kam, Kansas State University	98-100 Michael Goodman
	62, 63 James F. Shepard, Kansas State University	
	64 Bunji Tagawa	
	66 G. Steven Martin (вверху), Bunji Tagawa (внизу)	

**ПАТРИК С. ОЗМЕР** («Квazarы — зонды удаленных областей и ранних стадий нашей Вселенной») занимает должность директора Межамериканской обсерватории в Серро-Тололо (Чили). В 1965 г. окончил Политехнический институт им. Кейса по специальности астрономия. Степень доктора философии, также в области астрономии, получил в 1970 г. в Калифорнийском политехническом институте. В 1969 г. поступил на работу на обсерваторию Серро-Тололо на должность младшего научного сотрудника, а в прошлом году стал ее директором. Обсерватория оборудована 4-метровым телескопом, который был установлен в 1970 г. и по размерам занимает первое место в южном полушарии. Область научных интересов д-ра Озмера включает изучение атмосферных сверхярких звезд, Магелланова Облака и звездных источников рентгеновских лучей, а с 1974 г. еще и квазаров, ставших основной темой его исследований.

**РОНАЛЬД Д. ЛЕВАЙН** («Суперкомпьютеры») работает в фирме Technology Development of California, Inc., где изучает применение больших вычислительных систем для научных расчетов по контракту с НАСА. В Калифорнийском университете в 1960 и 1964 гг. получил степени соответственно бакалавра и магистра гуманитарных наук в области физики, а в 1970 г. — доктора философии в области математики. Учился также в Станфордском, Корнеллском и Кембриджском университетах. В 60-х годах работал в Берклиевской лаборатории им. Лоуренса, на Станфордском линейном ускорителе и в лаборатории реактивного движения Калифорнийского политехнического института. В 70-х годах в основном работал в Гумбольдтском университете, где на один срок был избран заведующим кафедрой математики. Д-р Левайн пишет о себе: «За два истекших десятилетия сфера моих научных интересов непрерывно расширялась, включая такие несхожие дисциплины, как теория относительности и математическая биология, причем в роли связующего звена всегда выступал мой интерес к вычислительным проблемам».

**АЛЬДО В. ЛА РОККА** («Лазеры в промышленности») работает в фирме Fiat Auto S. p. A. (Турин), где занимается внедрением перспективных технических методов в производство. В 1950 г. закончил Неаполитанский университет по специальности машиностроение. В 1951 г., будучи стипендиатом фонда Фулбрайта, поступил в Бруклинский политехнический институт. В период 1951 — 1955 гг. занимался исследованиями в области газодинамики в институтской лаборатории сверхзвуковой аэродинамики, где защитил диссертацию и получил степень доктора философии по специальности прикладная механика. В 1955 г. поступил на работу в фирму General Electric Company и занялся разработкой реактивных двигателей для космических летательных аппаратов. В 1972 г. вернулся в Италию и поступил в фирму Fiat, где специализировался в области промышленного применения лазеров.

**ДЕЙЛ А. РАССЕЛ** («Массовые вымирания позднего мезозоя») руководит отделом палеобиологии Канадского национального музея естественных наук (Оттава), где курирует исследования по теме «Ископаемые позвоночные». Окончил Орегонский университет, получил степени магистра гуманитарных наук и доктора философии соответственно в Калифорнийском университете (Беркли) и в Колумбийском университете. Свой нынешний пост занял в 1965 г., а до этого работал в Йельском университете, где в течение года после защиты докторской диссертации был стипендиатом национального научного фонда. Область научных интересов включает «экологию рептилий в конце эпохи их господства, эволюцию мозга у динозавров и направления эволюции многоклеточных, которые могут иметь значение для анализа развития внеземных экосистем».

**ДЖЕЙМС Ф. ШЕПАРД** («Регенерация растений картофеля из протопластов листа») состоит в звании профессора в Канзасском университете, специализируясь в области патологии растений. Закончил Корнеллский университет в 1963 г. и в Калифорнийском университете получил степени магистра естественных наук и доктора философии (1967 г.). В 1972 — 1973 гг. проходил стажировку в должности адъюнкт-профессора в Висконсинском университете, где начал изучать протопласт клеток растений. В 1973 г. перешел в Университет шт. Монтана и в 1975 г. получил звание профессора. В следующем году возглавил кафедру патологии растений в Канзасском университете и занимал этот пост в течение трех лет.

**ДЖ. МАЙКЛ БИШОП** («Онкогены») является профессором кафедры микробиологии Калифорнийского университета (Сан-Франциско). Степень бакалавра гуманитарных наук в области химии получил в Геттисбургском колледже в 1957 г. В 1962 г. получил диплом врача в Гарвардском высшем медицинском училище. В период 1964 — 1968 гг. работал в области вирусологии в Национальном институте аллергических и инфекционных заболеваний сначала в должности младшего, а потом старшего научного сотрудника. В 1968 г. перешел в Калифорнийский университет, где в 1972 г. получил звание профессора. Сфера его научных интересов в основном определяется темой публикуемой статьи: гены млекопитающих в вирусах и их роль в онкогенезе.

**ПОЛЬ БЕРНАР** («Древний греческий город в Центральной Азии») состоит в звании профессора в Школе прикладных исследований (Париж); специализируется в области археологии древней Греции. После окончания Высшей педагогической школы участвовал в раскопках вблизи Тасоса (Греция) в составе экспедиции Французской археологической школы (Афины). Перейдя на работу во Французский археологический институт (Бейрут), заинтересовался проблемой взаимоотношений между Грецией и Персией. В

1965 г. был назначен начальником французской археологической экспедиции в Афганистане, где возглавил исследования, которые легли в основу публикуемой статьи. В течение 1972 — 1973 гг. проходил стажировку в Институте перспективных исследований (Принстон).

**ТОНИ РОТМАН** («Короткая жизнь Эвариста Галуа») в настоящее время проходит стажировку в области астрофизики в Оксфордском университете. Окончив в 1975 г. Суартморский колледж, продолжил образование в Техасском университете (Остин), где в 1981 г. защитил докторскую диссертацию в области физики. Сфера научных интересов охватывает исследование черных дыр, образование барьонов в ранний период существования Вселенной и синтез атомных ядер в недрах звезд. Д-р Ротман не только ученый, а еще и писатель. На его счету один роман и несколько статей научно-популярного характера. В настоящее время он работает над вторым романом. Д-р Ротман пишет: «Интерес к Галуа пробудился у меня благодаря песне... которую я написал несколько лет назад. Речь в ней идет о русском поэте Пушкине и о Галуа. В процессе работы над песней я пришел к выводу, что сведения о жизни Галуа, обычно встречаемые в литературе на английском языке, по меньшей мере неточны».

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

**МИКРОКОМПЬЮТЕРНЫЕ  
МЕДИЦИНСКИЕ  
СИСТЕМЫ.  
Проектирование  
и применения**

Под редакцией У. Томкинса  
Перевод с английского

Одна из первых монографий, посвященных проектированию автоматизированных медицинских систем на основе микро-ЭВМ. Рассматриваются принципы создания и эксплуатации таких систем, особое внимание уделяется методам фильтрации биомедицинских сигналов. На многочисленных примерах демонстрируется использование систем в клинических исследованиях.

Для специалистов по медицинскому оборудованию, врачей и биологов.

1983, 37 л. Цена 4 р.



# Квazarы—зонды удаленных областей и ранних стадий нашей Вселенной

*Свет от этих загадочных объектов был испущен 15 млрд. лет назад, поэтому они предоставляют нам уникальный ключ к разгадке того, как выглядела Вселенная, когда она была в четыре раза моложе, чем сегодня*

ПАТРИК С.ОЗМЕР

ПРОШЛО 19 лет, с тех пор как М. Шмидт открыл квазары, однако до сих пор они представляют одну из самых непостижимых загадок астрономии. Хотя их природа пока остается предметом жарких споров, относительно их внешнего проявления уже не существует сомнений: квазары — это звездобразные объекты с большим красным смещением. Свет, излучаемый квазарами, сильно смещен к красному концу спектра, и это означает, что они удаляются от нас со скоростью, составляющей значительную долю скорости света. Если большие красные смещения квазаров действительно указывают на их удаление от нас, то они должны находиться значительно дальше, чем обычные галактики, красные смещения в спектрах которых свидетельствуют об общем расширении Вселенной. Мощность излучения квазара может в 1000 раз превышать мощность излучения целой галактики, насчитывающей 100 млрд. звезд. Свет от самых далеких квазаров отправился в путь, когда Вселенная была в четыре раза моложе, чем теперь, и этому излучению потребовалось 15 млрд. лет, чтобы достичь нас.

Я не собираюсь рассматривать в этой статье трудности, связанные с физикой квазаров, а хотел бы сконцентрировать внимание на том, что квазары могут повести нас о удаленных областях Вселенной и условиях на ранних стадиях ее существования. В качестве рабочей гипотезы я принимаю, что квазары — это чрезвычайно яркие ядра галактик, столь далеких, что они недоступны наблюдениям современными средствами. Вокруг нескольких слабых относительно близких квазаров обнаруживаются следы существования галактик, но далекие квазары можно отличить от звезд только по особенностям их спектров. Нелегко отличать квазары от звезд. Широкоугольный снимок неба, полученный большой камерой Шмидта (в основе которой лежит оптическая система, сконструированная в 1920-х годах Б. Шмидтом), содержит по меньшей мере 200000 звездобразных изображений, из которых лишь несколько сотен — это квазары.

Первые квазары были открыты астрономами при попытках отождествить источники космического радиоизлучения. По мере совершенствования радиоастрономических методов наблюдений точность определения положений радиочастотных непрерывно возрастала; во многих случаях они совпадали с звездобразными изображениями на фотопластинках. Поскольку радиоизлучение обычных

звезд не было доступно наблюдениям из-за несовершенства существовавших в то время инструментов, совпадение радиочастотника с звездобразным изображением служило хорошим критерием для выделения квазаров из звезд. В результате среди первых отождествленных квазаров многие были сильными радиочастотниками; отсюда и название — квазизвездный источник космического радиоизлучения, или сокращенно квазар.

Однако вскоре выяснилось, что подавляющее большинство квазаров — слабые радиочастотники, и поэтому они не были обнаружены при помощи радиотелескопов. А. Сэндейдж, работая на 5-метровом телескопе Хейла обсерватории Маунт-Паломар, установил, что в ультрафиолетовой области спектра квазары излучают гораздо интенсивнее, чем обычные звезды, и поэтому их можно отождествлять, сравнивая звездобразные изображения на пластинках, чувствительных к ультрафиолетовым лучам, с изображениями на обычных пластинках, чувствительных к свету в голубом конце видимой области спектра. Сэндейдж показал, что радиоспокойные (являющиеся слабыми источниками радиоизлучения) квазары гораздо более многочисленны, чем квазары, интенсивно излучающие радиоволны.

В ПОСЛЕДНЕЕ время разработан новый оптический метод обнаружения квазаров с большим красным смещением, который дополняет метод, основанный на их высокой яркости в ультрафиолетовой области спектра. Идея этого метода возникла случайно, как «побочный продукт» проекта, который М. Смит и я начали осуществлять несколько лет назад. Мы предприняли исследование нескольких галактик с сильными эмиссионными линиями в их спектрах вместо более характерных линий поглощения. Исследование проводили на 60-сантиметровой камере Кертиса — Шмидта Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Чили) и на двух телескопах-рефлекторах диаметром 1,5 и 4 м. Смит намеревался сфотографировать спектры большого числа слабых объектов при помощи призмы, помещенной перед входным отверстием камеры Кертиса — Шмидта.

Метод разложения света точечных изображений звезд в спектры при помощи объективной призмы давно и плодотворно применяется в звездной астрономии. Новым в методе Смита является одновременное использование призмы низкой дисперсии (чтобы получать спектры слабых объектов) и недавно появившихся фо-

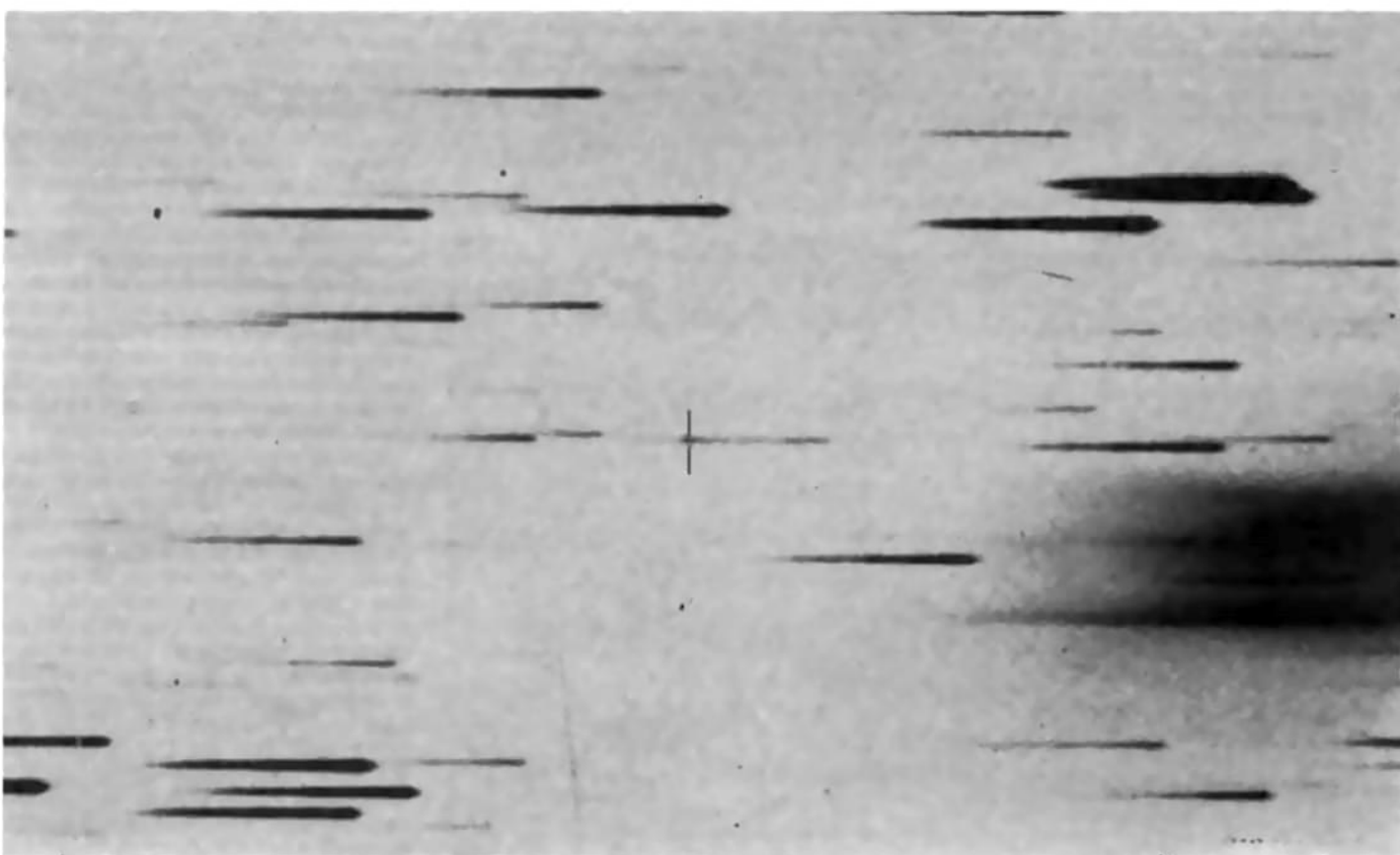
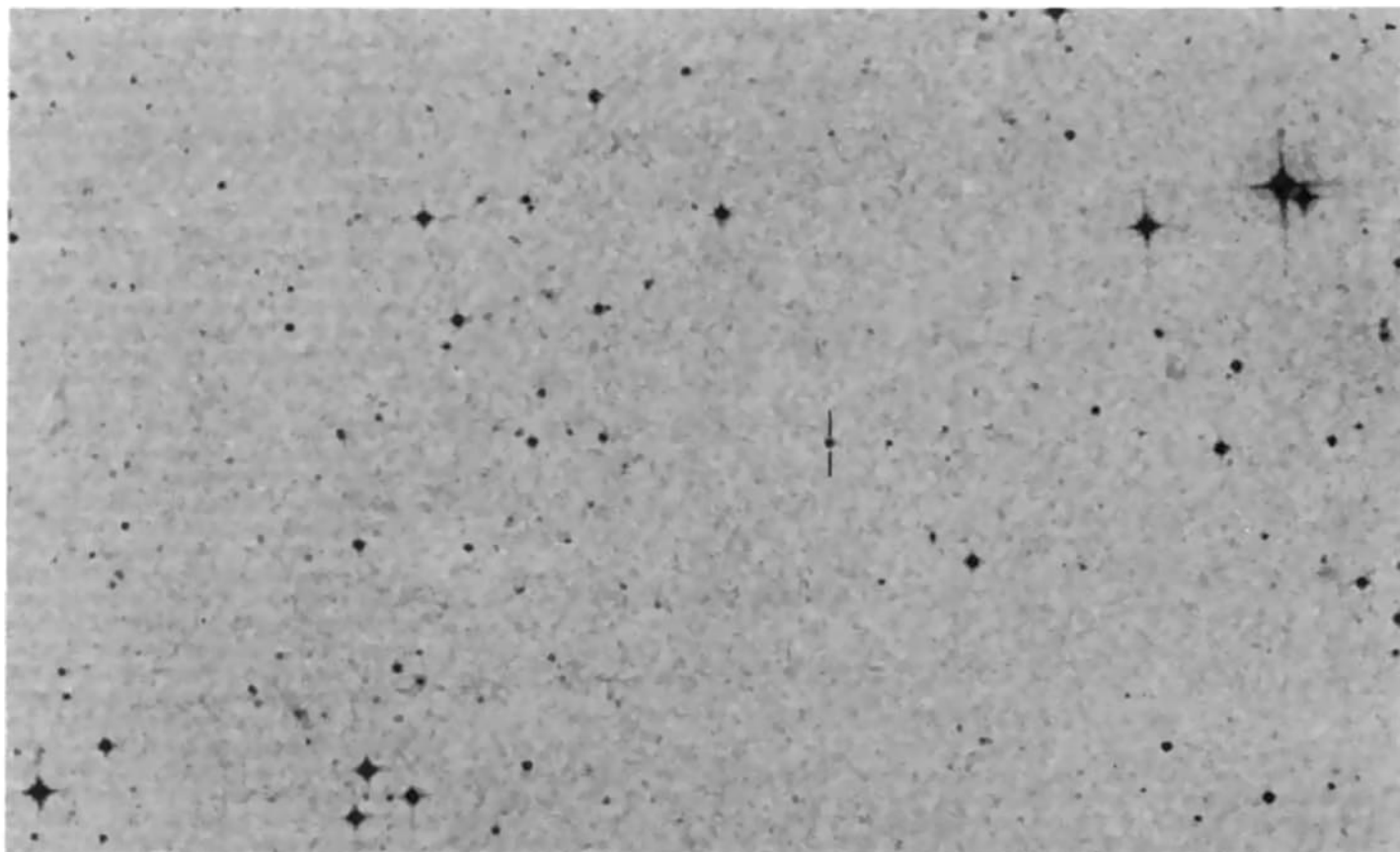
топластинок с мелкозернистой эмульсией и высоким контрастом. Такая комбинация, а также превосходные условия наблюдений на обсерватории Серро-Тололо позволили регистрировать спектры более слабых объектов, чем при помощи камеры Кертиса — Шмидта такого небольшого размера. После того как этим методом выявлены галактики с эмиссионными линиями, их спектральные особенности можно более подробно изучать по спектрам, полученным на больших телескопах.

Изучая широкоугольные пластинки, отснятые камерой Кертиса — Шмидта, Смит обратил внимание на то, что кроме галактик с эмиссионными линиями, которые мы искали, на снимках было несколько объектов, возможно квазаров, с эмиссионными линиями, занимающими неожиданные положения в спектрах. Когда мы исследовали эти объекты более тщательно при помощи видиконного спектрометра, который я использовал для нашего проекта, оказалось, что это действительно квазары с большим красным смещением. Таким образом, метод Смита обеспечивает прямое и эффективное средство обнаружения квазаров среди объектов на широкоугольных пластинках. К тому же этот метод более эффективен для поисков квазаров с большими красными смещениями, чем метод, основанный на их высокой яркости в ультрафиолетовой области спектра.

При помощи камеры Кертиса — Шмидта Смит выполнил обзор широкой полосы южного неба. Кроме того, вместе с Артуром Хоугом (Национальная обсерватория Китт-Пик) он продолжил этот обзор до более слабых звездных величин в участках небольших угловых размеров с применением прозрачной дифракционной решетки (действующей так же, как призма), помещенной в главный фокус 4-метрового телескопа обсерватории Серро-Тололо. Я продолжил изучение квазаров, открытых в обоих обзорах, при помощи более чувствительного видиконного спектрометра. Эти комбинированные наблюдения послужили основой для новых результатов, которые я опишу ниже.

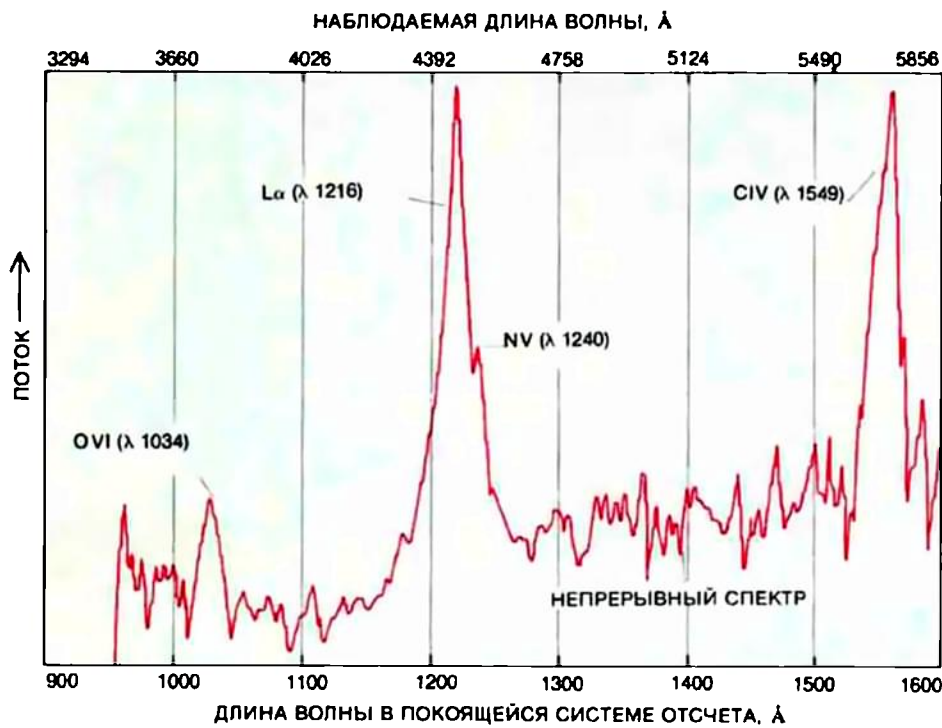
СПЕКТРЫ квазаров сильно отличаются от спектров всех других астрономических объектов. Вследствие большого красного смещения в видимую область попадает ультрафиолетовая часть спектра, никогда прежде не регистрировавшаяся наземными телескопами. Красное смещение, часто обозначаемое буквой  $Z$ , определяется вычитанием длины волны эмиссионной линии в покоящейся системе



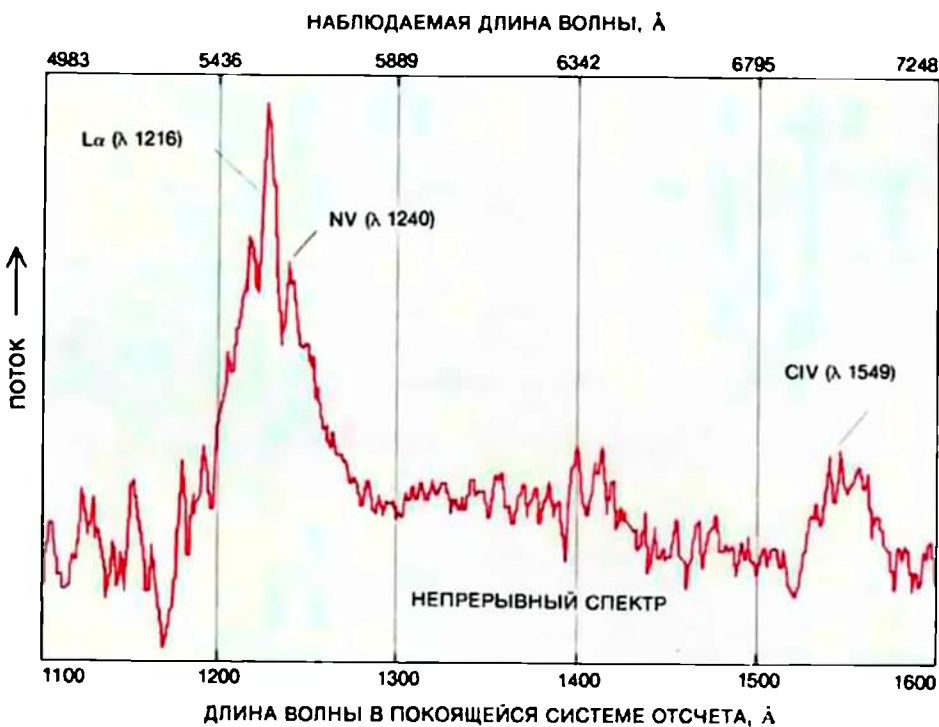


МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ КВАЗАРОВ иллюстрируется этими двумя снимками, сделанными на 60-сантиметровой камере Кертиса — Шмидта Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Чили). На обычной фотографии неба квазары и звезды неотличимы друг от друга, поскольку те и другие выглядят как точки (негативный отпечаток *вверху*). Если перед входным отверстием камеры Кертиса — Шмидта поместить тонкую призму, то изображение каждого объекта разлагается в спектр (негативный отпечаток того же участка неба *внизу*). На нижнем снимке длинноволновый (красный) конец спектра расположен *справа*, а коротковолновый (фиолетовый) — *слева*. В спектрах звезд либо

вообще отсутствуют детали, либо имеются светлые линии, указывающие, что излучение звезды частично поглощается. Квазар, отмеченный вертикальной чертой на обоих снимках, легко заметить благодаря сильной эмиссионной линии водорода  $L\alpha$ , смещенной от своего положения в покоящейся системе отсчета при  $1216 \text{ \AA}$  в далекой ультрафиолетовой области к длине волны  $3720 \text{ \AA}$  на границе видимой области спектра. Это соответствует красному смещению 2,06. Данный квазар QO 149 — 397 был открыт М. Смитом при помощи метода объективной призмы на камере Кертиса — Шмидта одним из первых.



СПЕКТРЫ КВАЗАРОВ свидетельствуют о том, что излучающие атомы сильнее ионизованы (лишены большего числа электронов), чем атомы в туманностях, окружающих горячие молодые звезды в нашей Галактике. Эмиссионные линии сильно смещены к красному концу спектра от их положения в покоящейся системе отсчета. Этот спектр квазара OQ 453 — 423 был получен при помощи видиконного спектрометра на 1,5-метровом телескопе обсерватории Серро-Тололо. Сильная линия атомарного водорода L $\alpha$  смещена от длины волны 1216 Å в ультрафиолетовой области спектра к длине волны 4451 Å в голубой области видимого спектра. Это соответствует красному смещению 2,66 [(4451 — 1216)/1216]. Видно, что эмиссионные линии пятикратно ионизованного кислорода OVI, четырехкратно ионизованного азота NV и трижды ионизованного углерода CIV имеют сравнимые красные смещения.



САМОЕ БОЛЬШОЕ КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ 3,53 имеет квазар OQ 172. В его спектре, полученном на 4-метровом телескопе обсерватории Серро-Тололо, линия L $\alpha$  смещена от 1216 Å к 5508 Å в зеленую область видимого спектра. Многочисленные линии поглощения слева от L $\alpha$  вызваны газовыми облаками, расположенными на луче зрения между квазаром и Солнечной системой.

отсчета (не подвергшейся красному смещению) из наблюдаемой длины волны и делением полученной разности на длину волны в покоящейся системе отсчета. Самой сильной в спектрах квазаров является линия атомарного водорода серии Лаймана L $\alpha$ , смещенная от своего положения в ультрафиолетовой области спектра при длине волны 1216 Å в покоящейся системе отсчета вплоть до длины волны 5500 Å в желто-зеленую область спектра, т.е. при максимальном наблюдаемом красном смещении ее длина волны возрастает в 4,5 раза. В этом случае  $Z = 3,5$  [(5500 — 1216)/1216]. В спектрах квазаров с большими красными смещениями хорошо заметны также эмиссионные линии кислорода, азота и углерода, которые в покоящейся системе отсчета лежат в ультрафиолетовой области между 1034 и 1549 Å.

Кроме того, во многих случаях эмиссионные линии широки; это указывает на то, что окружающий квазар газ движется со скоростью порядка 10000 км/с. Физические условия, определенные по интенсивности различных линий, свидетельствуют о том, что температура газа выше, чем в газовых туманностях, и что центральный источник в квазаре излучает совсем не так, как нормальная звезда. Однако для нашего рассмотрения главное то, что линия L $\alpha$  является сильнейшей в спектрах квазаров, и поэтому ее легко заметить на пластинках, полученных с объективной призмой на камере Кертиса — Шмидта. По этой причине методу объективной призмы следует отдать предпочтение при поиске квазаров с большим красным смещением.

Если интерпретировать красное смещение как скорость удаления объекта, то сдвиг линии L $\alpha$  в ближнюю ультрафиолетовую область спектра к длине волны 3648 Å, эквивалентное  $Z = 2$ , соответствует скорости, равной 0,8 скорости света. Квазар OQ 172 с самым большим известным красным смещением  $Z = 3,53$ , очевидно, удаляется от нас со скоростью, равной 0,91 скорости света. Для сравнения укажем, что звезды в галактиках движутся со скоростями порядка 0,001 скорости света, а ближайшие галактики удаляются от нас со скоростями, не превышающими 0,01 скорости света.

Более чем за четверть века измерений красных смещений галактик на 2,5-метровом телескопе обсерватории Маунт-Вилсон и 5-метровом телескопе обсерватории Маунт-Паломар максимальное значение, зарегистрированное М. Хьюмасоном в 1949 г., составляло  $Z = 0,2$ . Лишь 11 лет спустя Р. Минковский, также работавший на 5-метровом телескопе, переместил предел к  $Z = 0,46$ , и этот рекорд держался много лет. Меньше чем через два года после открытия в 1963 г. М. Шмидтом первого квазара 3C 273 с довольно небольшим красным смещением 0,158 был преодолен рубеж  $Z = 2$ . Максимальное значение  $Z = 3,53$  было зарегистрировано в 1973 г.

Если красное смещение квазаров обусловлено общим расширением Вселенной, то квазары — это не близкие объекты, по той или иной причине движущиеся с высокими скоростями, а чрезвычайно удаленные объекты. Это прямое следствие вывода, сделанного в 1929 г. Э. Хабблом и основанного на наблюдениях Хьюмасона, согласно которому галактики

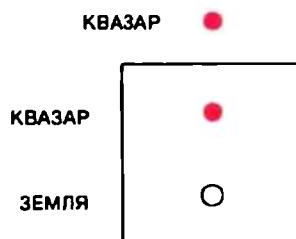
удаляются от нас (и друг от друга) со скоростями, пропорциональными их расстояниям. Если исходить из принятой в настоящее время космической шкалы расстояний, то галактика с красным смещением всего 0,01 (или скоростью удаления 3000 км/с) находится на расстоянии 200 млн. световых лет. Это уже довольно значительное расстояние. Ближайшая спиральная галактика в созвездии Андромеды находится на расстоянии всего около 2 млн. световых лет. Расстояния же до квазаров колоссальны. Квазары с самыми большими известными красными смещениями находятся вблизи границы наблюдаемой Вселенной.

**В** АСТРОНОМИИ измерение расстояний всегда было нелегкой задачей. Лишь расстояния до ближайших звезд были измерены прямым тригонометрическим методом (методом параллакса), подобно тому как топографы измеряют расстояния на Земле. Расстояния до более далеких объектов были определены путем экстраполяции. Никто не станет утверждать, что красные смещения дают абсолютные расстояния до галактик, но общепринято, что красные смещения являются хорошей мерой относительных расстояний.

Из концепции расширяющейся Вселенной следует, что объект с большим красным смещением виден таким, каким он был в далеком прошлом. Свет от квазара с красным смещением 3, регистрируемый нами сегодня, был испущен 15 млрд. лет назад. Свет от квазара с красным смещением всего лишь 1 находится в пути 10 млрд. световых лет — в течение времени, равного половине возраста Вселенной.

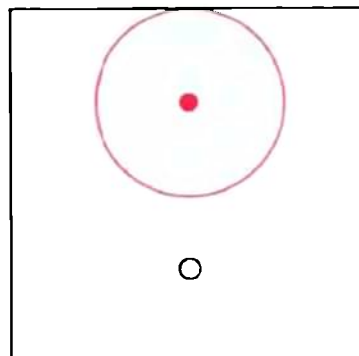
Еще одно следствие из теории расширяющейся Вселенной состоит в том, что красное смещение дает нам прямую оценку коэффициента ее расширения. Свет от квазара с красным смещением 3 был испущен тогда, когда наблюдаемая область Вселенной была в четыре раза меньше, чем сегодня, т.е. все ее объекты были в четыре раза ближе друг к другу. Поэтому распределение квазаров по красным смещениям позволяет нам судить о строении и свойствах Вселенной на ранних стадиях ее эволюции. Добавлю, что математические соотношения, описывающие связь между красными смещениями и свойствами Вселенной, сложны и противоречивы, так как базируются на общих предположениях, выведенных из пока ограниченных данных наблюдений. Однако некото-

$t = 0$   
 $t = 0,25$   
 (5 МЛРД. ЛЕТ)



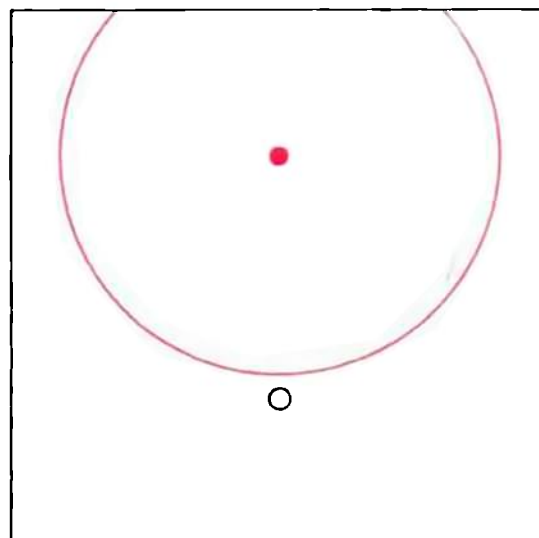
$t = 0,5$   
 (10 МЛРД. ЛЕТ)

КВАЗАР  
 ЗЕМЛЯ



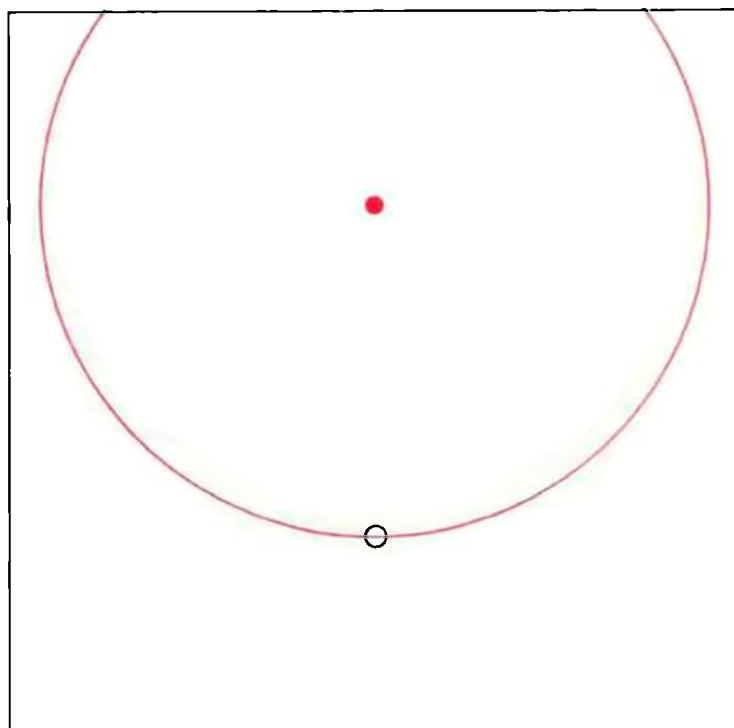
$t = 0,75$   
 (15 МЛРД. ЛЕТ)

КВАЗАР  
 ЗЕМЛЯ



$t = 1$   
 (20 МЛРД. ЛЕТ)

КВАЗАР  
 ЗЕМЛЯ



**СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ** наблюдаемой части Вселенной в различные эпохи иллюстрирует, каким образом квазары могут поведать нам об условиях, существовавших на различных стадиях ее эволюции. Свет от квазара с красным смещением 3, достигающий Земли сегодня, был испущен 15 млрд. лет назад, т.е. спустя всего лишь 5 млрд. лет после начала расширения Вселенной из сингулярного (сверхгорячего и сверхплотного) состояния в момент  $t = 0$ . В возрасте 5 млрд. лет наблюдаемая область Вселенной была в четыре раза меньше, чем теперь. Цветные круги показывают, какое расстояние проходило излучение квазара по мере того, как Вселенная расширялась, а квазар и наша Галактика удалялись друг от друга. В конце концов излучение достигает телескопа земного наблюдателя.

рые результаты нашего исследования относительно независимы от исходных предположений; именно на них мы и обратим основное внимание.

На заре исследований квазаров многие астрономы надеялись, что квазары помогут решить, какая из существующих теорий эволюции Вселенной верна. Эти надежды не оправдались, но в конце 60-х годов М. Шмидт открыл замечательное свойство квазаров: они гораздо более многочисленны на больших расстояниях от нас, чем в наших окрестностях. При красном смещении 2, или около 13 млрд. лет назад, их пространственная плотность была в 1000 раз выше, чем сегодня. Очевидно, какой-то процесс привел к тому, что квазары были чрезвычайно активны в молодой Вселенной и практически исчезли к настоящему времени.

В то время, когда Шмидт изучал пространственную плотность квазаров, максимальное известное красное смещение было равно 2,88. Это значение казалось огромным по сравнению с тем, что ожидалось лишь несколько лет назад, и из результата Шмидта следовало, что квазары с гораздо большими красными смещения-

ми должны быть многочисленны. Но почему не были открыты квазары с красными смещениями, превосходящими 3? Шмидт и Сэндейдж обратили внимание на этот факт и предположили, что красные смещения квазаров, возможно, имеют предел.

Значение такого предела было бы чрезвычайно важным. Его существование означало бы, что по крайней мере один тип объектов астрономы видят вплоть до границы наблюдаемой Вселенной. Это могло бы иметь место в том случае, если бы квазары внезапно образовались в результате мощного всплеска активности 15 млрд. лет назад. Такая концепция, безусловно, сильно повлияла бы на представления о фундаментальной природе квазаров. К тому же если принять, что квазары — это проявление мощного энергетического процесса в центрах галактик, то существование предельного красного смещения имеет важное значение для эволюции самих галактик.

Разумеется, астрономы продолжали поиски квазаров с еще большими красными смещениями. Высказывалось мнение, что видимый предел обусловлен каким-то

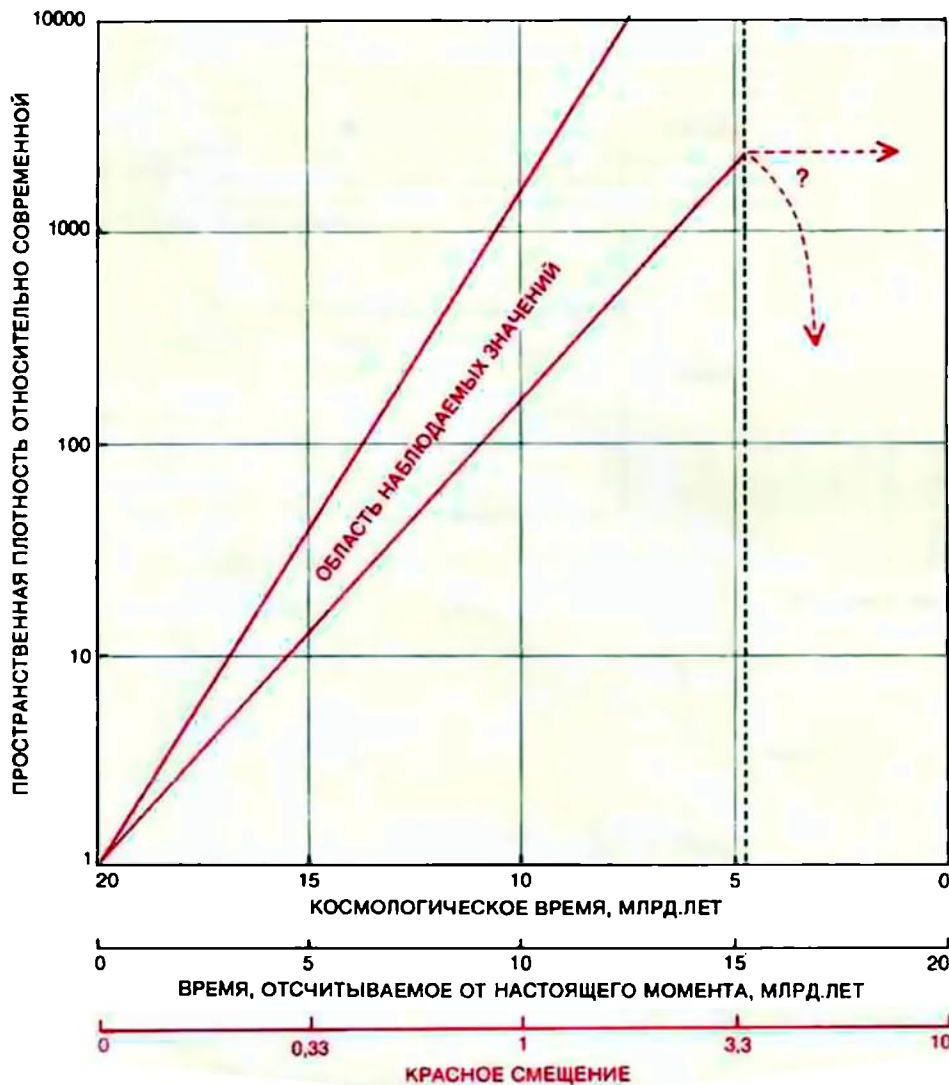
эффектом отбора в методах отождествления, несмотря на то что известные квазары были найдены в совершенно различных обзорах, выполненных разными методами. Больше всего разногласий было по поводу того, будут ли квазары с красными смещениями, превосходящими 2,5 или 3, по-прежнему ярче в ультрафиолетовой области, чем обычные звезды, или нет. Квазар с красным смещением 2,88 не имел заметного ультрафиолетового избытка, а поскольку самая сильная линия  $L\alpha$  в его спектре была смещена в середину видимой области, этот и другие подобные объекты было бы трудно отличить от обычных звезд.

И действительно, когда в 1973 г. был открыт квазар с красным смещением 3,53, он оказался красного цвета. Его удалось отождествить только благодаря усилиям радиоастрономов, измеривших его координаты с высокой точностью. Если бы это был радиоспокойный квазар, то на него не обратили внимания. Обнаружение этого квазара, а также неуверенность в том, что прежние обзоры были достаточно полны, оставили открытым вопрос о реальности предельного значения красного смещения.

**Б**ЛАГОДАРЯ развитию нашего метода объективной призмы на обсерватории Серро-Тололо стал возможен новый подход к решению этой проблемы. Поскольку метод основан исключительно на поиске эмиссионных линий, он абсолютно не зависит от того, на какую спектральную область приходится максимум излучения квазаров — ультрафиолетовую или какую-либо еще. Хотя этот метод с неизбежностью имеет свои погрешности, они по крайней мере отличаются от погрешностей всех других методов.

Метод объективной призмы позволяет обнаруживать в спектрах квазаров линию  $L\alpha$ , смещенную к красному концу вплоть до предела чувствительности фотозмульсии. Эмульсия, выбранная Хоугтом и Смитом для их обзора на 4-метровом телескопе, способна зарегистрировать линию  $L\alpha$ , смещенную до длины волны  $6900 \text{ \AA}$ , что эквивалентно красному смещению 4,7. Однако ни у одного из 71 открытого в этом обзоре квазара красное смещение не превосходило 3,45 — значения, близкого к известному пределу 3,53, но несколько меньше его. Этот результат наводил на размышления, и, как впоследствии показали Р. Карсуэлл из Кембриджского университета и Смит, чувствительность обзора Хоугта — Смита была недостаточна для того, чтобы утверждать, что пространственная плотность квазаров с красными смещениями больше 3,5 действительно падает. Поэтому был выполнен новый обзор.

Я наблюдал на 4-метровом телескопе обсерватории Серро-Тололо по программе, оптимальной для поиска квазаров с красными смещениями от 3,7 до 4,7, если такие существуют. Использовались прозрачная дифракционная решетка для области спектра  $6000 \text{ \AA}$  и фильтр, поглощающий свечение ночного неба в области ближе  $5700 \text{ \AA}$ . Мне удалось найти квазары, в три раза более слабые, чем обнаруженные Хоугтом и Смитом, в критической области  $5700 - 6900 \text{ \AA}$ . Я выделил 15 объектов с эмиссионными линиями, красное смещение каждой из которых могло



ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЛОТНОСТЬ КВАЗАРОВ 15 млрд. лет назад была в 1000 раз выше, чем теперь (согласно расчетам М. Шмидта, открывшего в 1963 г. первый квазар). Из отсутствия квазаров с красным смещением больше 3,53 следует, что астрономы проникли вплоть до самой ранней стадии образования квазаров. Всего в настоящее время известно около 1500 квазаров.



СКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК В СОЗВЕЗДИИ ЦЕНТАВРА — одно из многих подобных скоплений. Снимок сделан на 4-метровом телескопе обсерватории Серро-Тололо. Это скопление галактик, находящееся на расстоянии 225 млн. световых лет от нас, насчиты-

вает 250 больших галактик, среднее расстояние между которыми 700 000 световых лет. Если бы удалось объяснить процесс образования скоплений, то это помогло бы понять, как образовались галактики в ранней Вселенной.

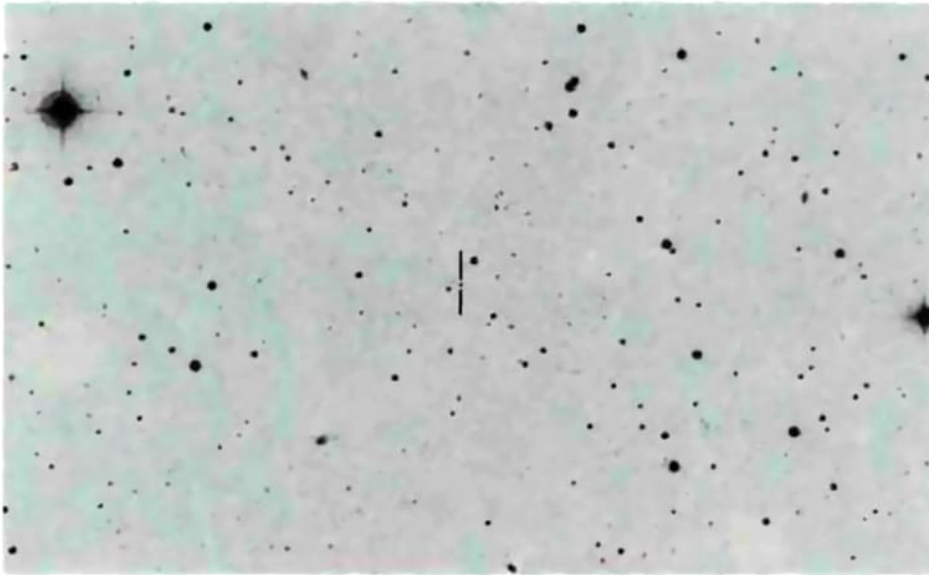
превышать 3,5. Однако последующие наблюдения с видиконным спектрометром показали, что ни в одном спектре на пластинке нет линий  $L\alpha$ . В пяти спектрах линии принадлежали углероду в квазарах с красными смещениями от 2,8 до 3,4; все остальные объекты оказались квазарами с красными смещениями 1 или галактиками с красными смещениями 0,2. Хотя эти результаты разочаровывают, они в то же время свидетельствуют о том, что квазары с красным смещением 4 можно было бы обнаружить, если бы они присутствовали. Все новые квазары были открыты по линиям более слабым, чем  $L\alpha$ , в отличие от предыдущего обзора, выполненного методом объективной призмы. Последующий количественный анализ показал, что результаты нового обзора поддаются объяснению, если только пространственная плотность квазаров с красным смещением 3,5 в три раза ниже, чем квазаров с красным смещением 3. Этот предел не исключает того, что может быть открыто несколько более далеких квазаров, но он убедительно показывает, что мы достигли точки, после которой начинается спад.

Свидетельством в пользу существования предельного красного смещения являются также неудачные попытки радиоастрономов найти более далекие квазары, несмотря на то что они располагают теперь очень точными координатами и поэтому больше не зависят от цветов «кандидатов в квазары». Недавно астрономы изучили то же поле по данным, собранным на рентгеновском спутнике «Эйнштейн». Хотя телескоп спутника с легкостью зарегистрировал самый далекий квазар OQ 172 и несколько квазаров с красными смещениями около 3,1, ему не удалось побить рекорд. Очередные надежды возлагаются на орбитальный космический телескоп, вывод которого на околоземную орбиту намечен на 1985 г. Быть может, он даст ответ на вопрос, какова крутизна спада вблизи предела.

Наша работа на Серро-Тололо показывает, что пространственная плотность квазаров велика вплоть до красного смещения 3,2. Предел при 3,5 означает резкое изменение свойств Вселенной. Одно из простейших объяснений состоит в том, что квазары внезапно образовались 15 млрд. лет назад, и это было замеча-

тельным событием в эволюции Вселенной. Альтернативная гипотеза состоит в том, что на расстоянии, соответствующем красному смещению 3,5, находится поглощающая свет пыль или какое-либо вещество, не позволяющее нам видеть более далекие квазары. Если бы оказалось, что Вселенная прозрачна по одну сторону от этого барьера и непрозрачна по другую, то это также представляло бы значительный интерес. В любом случае дальнейшая работа, вероятно, приведет к важным результатам в последующие несколько лет.

ДО СИХ ПОР я рассматривал только радиальное распределение квазаров; исторически оно также было изучено первым. Теперь, когда полностью проанализированы данные, полученные на обсерватории Серро - Тололо, массив данных о больших красных смещениях достаточно надежен для того, чтобы заняться трехмерным распределением квазаров. Объединяя красные смещения с координатами квазаров на небесной сфере, можно построить трехмерную картину их пространственного распределения. Это



**КВАЗАР OQ 172 — САМЫЙ ДАЛЕКИЙ ИЗ ВСЕХ ИЗВЕСТНЫХ** в настоящее время объектов, имеющий красное смещение 3,53, на снимке, сделанном камерой Шмидта обсерватории Маунт-Паломар, выглядит как ничем не примечательная звездочка. Квазар OQ 172 был открыт в 1973 г. на Ликской обсерватории Дж. Умплером, Л. Робинсоном, Дж. Болдуином и М. Бербидж.



**ПОИСКИ КВАЗАРОВ НА ОБСЕРВАТОРИИ СЕРРО-ТОЛОЛО** проводились вдали от плоскости Млечного Пути, чтобы избежать влияния межзвездной пыли, которая сильно поглощает свет далеких галактик и квазаров. Серая полоса — область, изученная Смитом на 60-сантиметровой камере Кертиса — Шмидта с объективной призмой. Семь маленьких участков общей площадью 5,1 квадратного градуса были сфотографированы Смитом и Хоугом на 4-метровом телескопе, которому доступны объекты, в четыре раза более слабые, чем камере Кертиса — Шмидта.

единственная имеющаяся в нашем распоряжении информация о строении Вселенной 13 — 15 млрд. лет назад. Трехмерное распределение может также дать ключ к разгадке природы самих квазаров.

На снимках больших участков неба видно, что галактики распределены далеко не равномерно. Они объединяются в пары, небольшие группы, более многочисленные группы и в огромные скопления. Часто попадаются области, содержащие лишь несколько галактик или лишенные их вообще. Изучение распределения галактик играет важную роль в создании теорий их образования. Согласно современным данным, на ранних стадиях эволюции Вселенной вещество было распределено равномерно и находилось в газообразном состоянии. Как же тогда возникли конденсации, из которых впоследствии в ходе расширения Вселенной образовались звезды, галактики и скопления галактик?

Как только возникает уплотнение, поле гравитации которого достаточно, чтобы препятствовать расширению вещества, это уплотнение может самими различными способами сжаться под действием соб-

ственной силы тяжести и породить звезду, а то и целую галактику. Многочисленные расчеты показывают, что, как только объем газа начинает сжиматься, происходит стремительное падение вещества к центру, а это ведет к быстрому нарастанию плотности. Если масса сжимающегося газа равна массе галактики, то легко представить себе, что в результате неудержимого гравитационного коллапса в центре галактики может возникнуть квазар как некоторая стадия ее эволюции. Это одна из возможных связей между квазарами и происхождением галактик. Другая возможность состоит в том, что квазары сами достаточно мощны, чтобы оказывать влияние на процессы образования в масштабах, значительно превышающих отдельную галактику. В этом случае распределение квазаров может отличаться от распределения галактик, которые доступны наблюдениям только на гораздо более поздних стадиях расширения Вселенной.

Чтобы сопоставить первое представление о распределении квазаров, проанализируем данные, полученные на обсерватории Серро-Тололо, различными спосо-

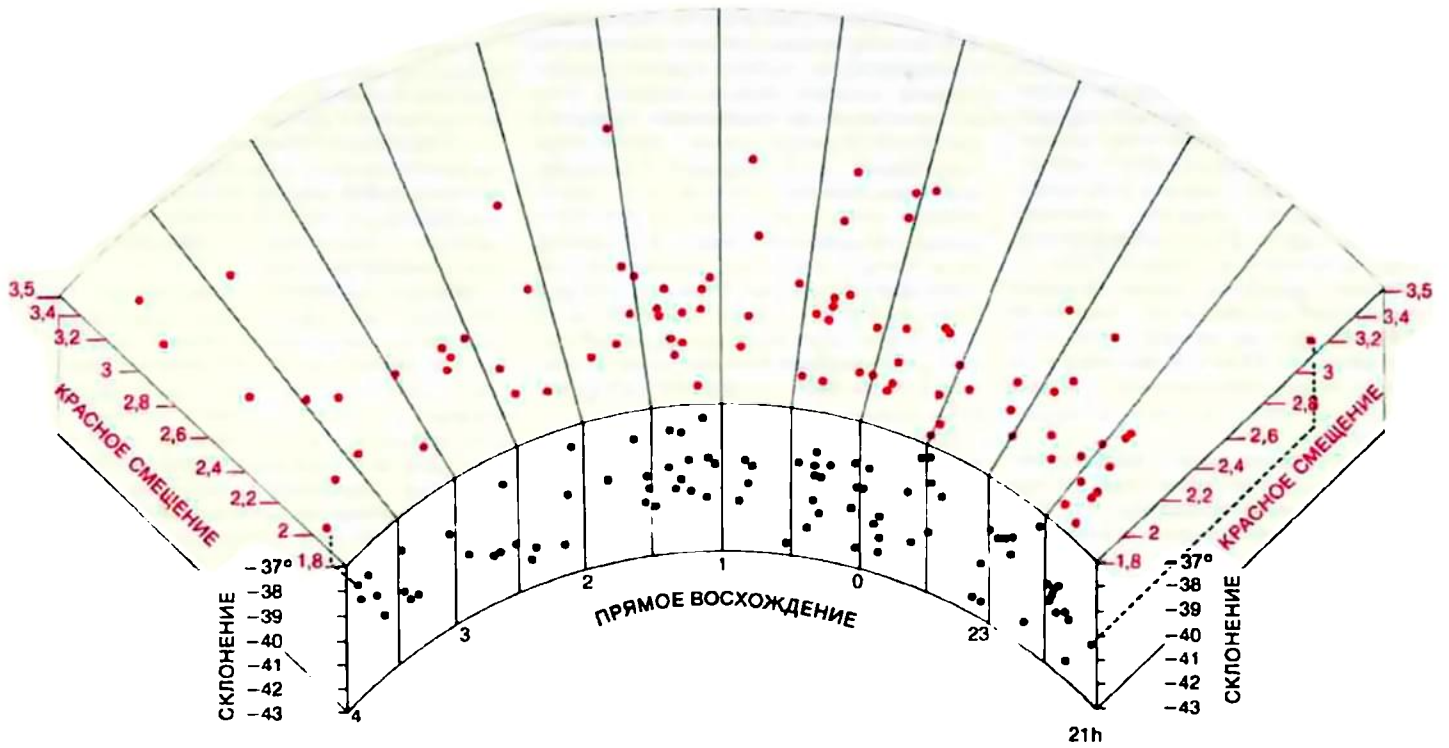
ми. Область неба, изученная в обзорах на Серро-Тололо, покрывает полосу, простирающуюся от  $-37,5$  до  $-42,5^\circ$  по склонению (эквиваленту географической широты) и опоясывающую четверть небесной сферы по прямому восхождению (эквиваленту географической долготы); см. рисунок слева внизу. Эта полоса сфотографирована с помощью камеры Кертиса — Шмидта на 15 слегка перекрывающихся пластинках с полем  $5 \times 5^\circ$ . (Угловое расстояние между двумя звездами в созвездии Большой Медведицы, указываемыми на Северный полюс, составляет как раз  $5^\circ$ .) В пределах этой широкой полосы были сделаны снимки 7 участков (каждый площадью один квадратный градус) на 4-метровом телескопе-рефлекторе; таким образом, он как бы вырезает длинные тонкие трубки в пространстве.

В обзоре на камере Кертиса — Шмидта найдено 88 квазаров с красными смещениями 1,8 и более. В обзоре на 4-метровом телескопе, охватывающем значительно меньшую площадь неба, отождествлены 53 квазара примерно с такими же красными смещениями, причем шесть из них выявлены и в обзоре на камере Кертиса — Шмидта. (Несколько ярчайших квазаров, отождествленных в обоих обзорах, были открыты ранее другими астрономами.) В обзоре с камерой Кертиса — Шмидта на каждые четыре квадратных градуса небесной сферы приходится один квазар с большим красным смещением; в обзоре на 4-метровом телескопе обнаруживается примерно в 40 раз больше квазаров на единицу площади, или 10 квазаров с большим красным смещением на квадратный градус.

Причина этого различия в том, что 4-метровый инструмент способен, разумеется, регистрировать гораздо более слабые объекты. Предельная звездная величина обзора на 4-метровом телескопе составляет 21, т.е. он обнаруживает объекты на 1,5 звездной величины, или в четыре раза более слабые, чем камера Кертиса — Шмидта. Хотя квазары, найденные в обзоре на 4-метровом телескопе, как правило, слабее, их красные смещения не больше, чем у объектов обзора на камере Кертиса — Шмидта. Большинство из 135 квазаров, выявленных в обоих обзорах, имеют красные смещения 2. Это возможно по двум причинам: либо метод поиска лучше всего подходит для обнаружения именно таких квазаров, либо квазары с таким красным смещением наиболее многочисленны. 135 квазаров, найденных в обзорах на Серро-Тололо, составляют четверть всех известных квазаров с красным смещением больше 1,8.

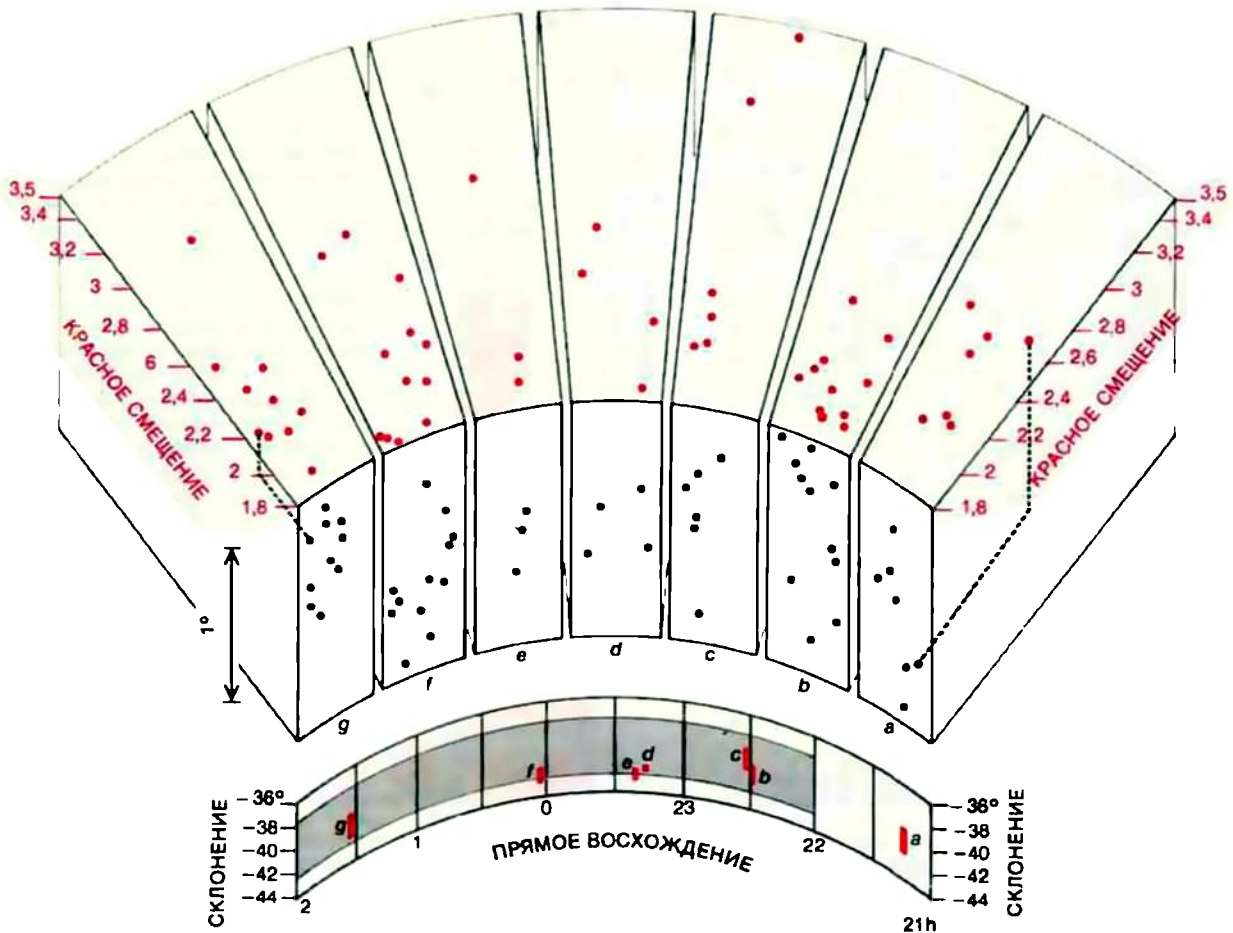
Чтобы представить себе реальное распределение квазаров, я нанес 88 квазаров обзора на камере Кертиса — Шмидта на трехмерную фигуру (см. рисунок на с. 13 вверху). Ее передняя поверхность имеет форму сегмента цилиндра, и на нее нанесены 88 квазаров в зависимости от их склонения и прямого восхождения. Красные смещения нанесены вдоль радиусов на верхней плоскости, причем шкала начинается с красного смещения 1,8 на передней границе и заканчивается при значении 3,5 на задней границе.

Из этого рисунка следует, что в области от 2 до 4 часов по прямому восхождению число квазаров меньше, чем в других областях. Если это разрежение отражает



ОБЗОР НА КАМЕРЕ КЕРТИСА — ШМИДТА содержит 88 квазаров с красными смещениями больше 1,8. Поскольку красное смещение коррелирует с расстоянием, для этих 88 объектов можно построить своего рода трехмерное распределение в пространстве. Черные точки на передней поверхности фигуры показывают положение квазаров на небесной сфере. Цветные точки на верхней поверхности показывают красное смещение каждого квазара.

Штриховые линии связывают самые крайние (справа и слева) квазары с точками, изображающими их красные смещения (слева — красное смещение 1,96, справа — 3,16). Для остальных квазаров эти линии опущены, чтобы не загромождать чертеж. Чтобы точки не сливались, масштаб по вертикали выбран в два раза больше, чем по горизонтали.



ОБЗОР НА 4-МЕТРОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ содержит 53 квазара с красными смещениями больше 1,8, причем 6 из них зарегистрированы также в обзоре на камере Кертиса — Шмидта. Здесь семь малых зон, исследованных на 4-метровом телескопе, произвольно представлены в виде фигур одинакового объема. Черные точки на передних поверхностях дают соответствующее положение квазара

в пределах его зоны. Выявляется несколько пар и групп квазаров с одинаковыми красными смещениями. Например, в зоне *f* четыре квазара на расстоянии 12 млрд. световых лет группируются вблизи красного смещения 1,84. Все они попадают в область поперечником не более 200 млн. световых лет.

реальную неоднородность в распределении квазаров в данной части пространства, то это весьма важный результат. Поэтому я и мои коллеги выдвинули гипотезу, согласно которой видимый дефицит квазаров обусловлен эффектами отбора. При анализе мелкомасштабного распределения выявляются пары и небольшие группы квазаров, лежащих довольно близко друг к другу. Такое сгущение лучше всего выявляется из данных обзора на 4-метровом телескопе, представленных на трехмерной диаграмме (см. рисунок на с. 13 внизу). Четыре квазара с красными смещениями от 1,83 до 1,86 группируются в области поперечником меньше 200 млн. световых лет вблизи прямого восхождения 0 часов.

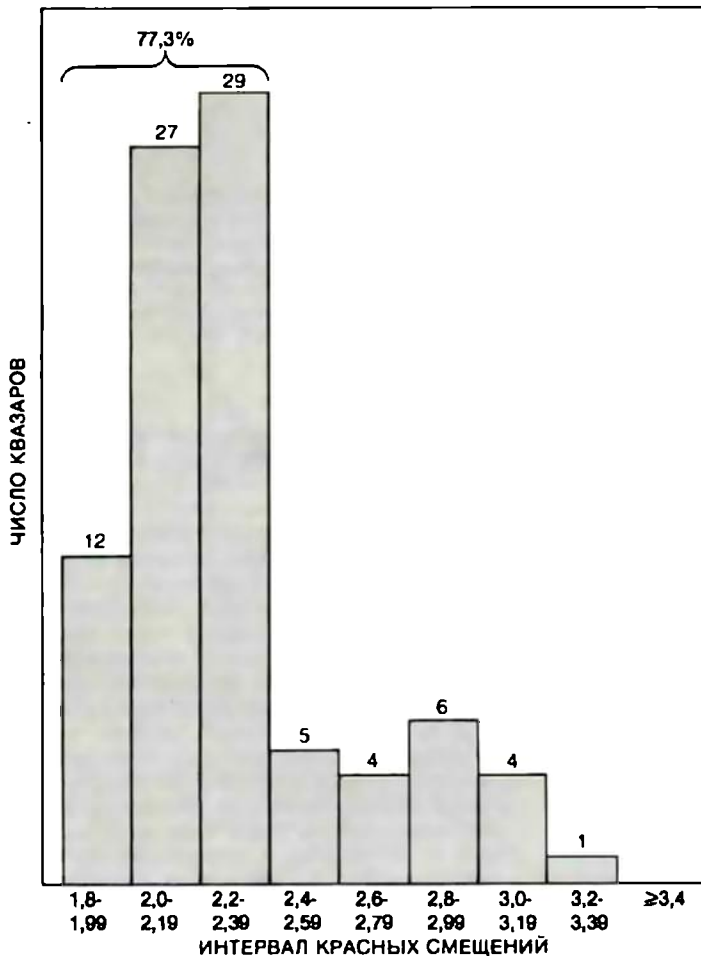
Эти группы представляют большой интерес, поскольку они имеют такие же размеры, как сверхскопления галактик, разбросанные в пространстве. Сверхскопления занимают области диаметром 300 млн. световых лет и включают несколько скоплений галактик. Это самые большие известные структуры во Вселенной. Сверхскопления с красными смещениями, достигающими 2, пока не наблюдались. А что если за этой группой квазаров с красными смещениями 1,84 скрывается далекое сверхскопление? Возможно, ответ на этот вопрос даст орбитальный космический телескоп.

**И**ССЛЕДОВАНИЕ распределения квазаров в пространстве, не менее важное, чем изучение их свойств, требует использования статистического анализа. Что скрывается за распределением квазаров? Являются ли наблюдаемые группы лишь случайными флуктуациями? Например, если зерна риса рассыпать по полу, то расстояние между некоторыми из них будет меньше среднего расстояния. В последние годы были разработаны мощные статистические методы исследования обзоров галактик с целью получить ответы на те же вопросы. При подходящей модификации, учитывающей большие красные смещения и эффекты селекции обзора, эти методы применимы и к квазарам.

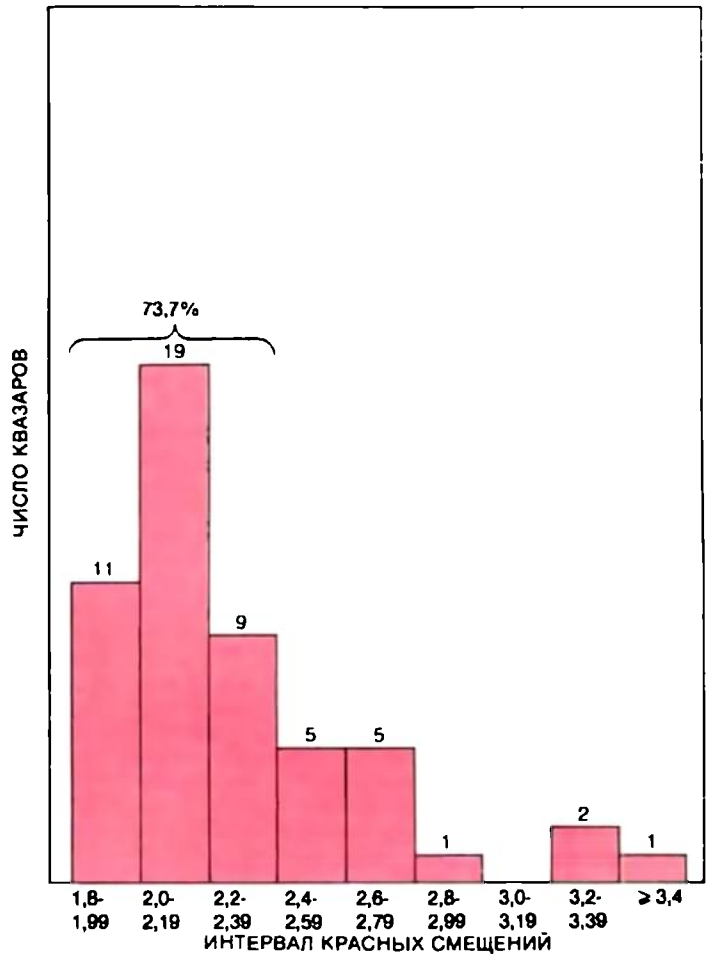
Основная задача — установить, отклоняется ли распределение квазаров от однородного случайного распределения. Если такие отклонения существуют, то хотелось бы знать, образуют ли квазары скопления и каковы они. Напротив, может оказаться, что квазары не стремятся образовывать скопления и находятся гораздо дальше друг от друга, чем ожидается. Это было бы возможно в том случае, если бы присутствие квазара в некоторой области пространства препятствовало образованию других квазаров в его окрестностях. Мы здесь не будем касаться математической формулировки этих гипотез и тех способов, при помощи кото-

рых можно установить, какая из них верна, отметим лишь, что графическое представление данных в двух измерениях очень хорошо подходит для этого. Тогда сильно сгущение или отсутствие скоплений легко различимо с первого взгляда. Однако если тенденция к сгущению или противоположная тенденция слаба, то такое распределение трудно отличить от случайного однородного распределения (см. рисунок на с. 15).

Результаты обзоров, выполненных на обсерватории Серро-Тололо, можно суммировать следующим образом: статистический анализ свидетельствует о случайном однородном распределении квазаров. Различимые на глаз пары и группы — это, очевидно, лишь случайные флуктуации. Для 30 не входящих в пары и группы квазаров с красными смещениями от 1,8 до 2,2 из обзора на 4-метровом телескопе среднее расстояние до ближайшего соседа составляет около 400 млн. световых лет, что хорошо согласуется со значением, ожидаемым при случайном распределении. Для квазаров с большими красными смещениями, средние расстояния между которыми измеряются миллиардами световых лет, можно сделать такой же вывод. Эти результаты свидетельствуют в пользу общепринятого, но труднодоказуемого предположения, согласно которому Вселенная в больших масштабах одно-



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КВАЗАРОВ ПО КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЯМ показывает, что около 3/4 всех квазаров из обоих обзоров на обсерватории Серро-Тололо имеют красные смещения от 1,8 до 2,4. Распределение 88 квазаров обзора на камере Кертиса — Шмидта приведено *слева*, а 53 квазаров обзора на 4-метровом телескопе — *справа*. В обзоре на камере Кертиса — Шмидта на каждые



четыре квадратных градуса небесной сферы приходится один квазар. В обзоре на 4-метровом телескопе, способном регистрировать более слабые объекты, на каждый квадратный градус в среднем приходится немногим более 10 квазаров. Эти квазары, как правило, слабее объектов из обзора на камере Кертиса — Шмидта, но они имеют примерно такие же красные смещения.



родна. Это предположение является важнейшим для современных космологических моделей.

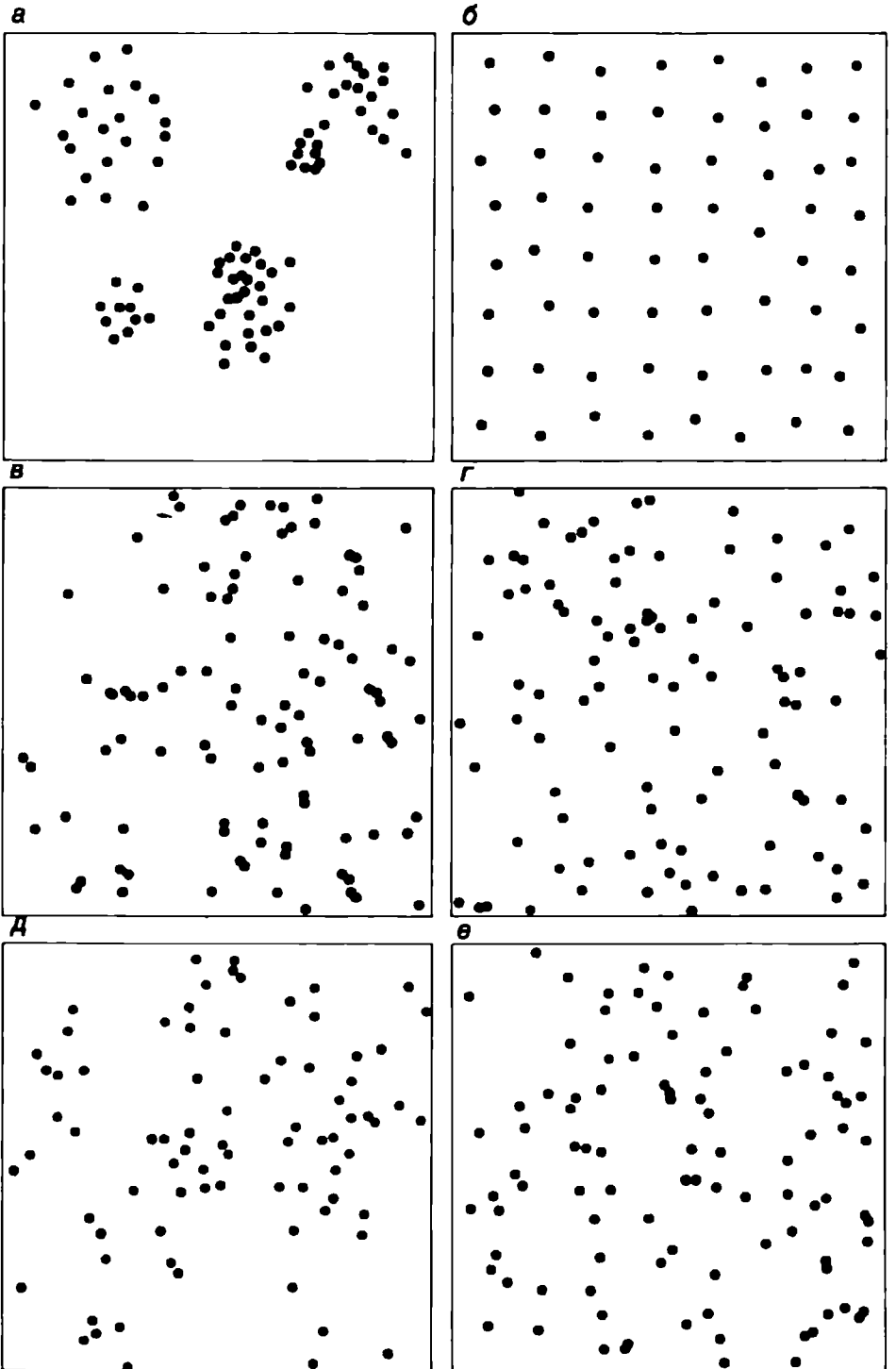
Хотя эти результаты обнадеживают, они знаменуют лишь первый шаг в непрекращающихся исследованиях, которые, вероятно, будут быстро продвигаться вперед по мере открытия все новых и новых квазаров. Если наблюдаемое сгущивание галактик экстраполировать к эпохе и расстояниям, достигнутым в обзорах квазаров, то, как можно показать, там его нельзя обнаружить на основе имеющегося сейчас материала. Быть может, орбитальный космический телескоп позволит повысить результативность метода исследования пространственного распределения до такой степени, что можно будет проверить, сгущиваются ли галактики и дальше. Ожидается, что скопления галактик существуют и при красном смещении, равном 2, но они слабее выделяются на фоне более плотного вещества той эпохи, чем скопления с меньшими красными смещениями, наблюдаемые в более позднюю эпоху в сильно расширившейся, а потому менее плотной Вселенной. В то же время нельзя игнорировать пары и группы квазаров, видимые в обзоре на 4-метровом телескопе. Ведь одна из теорий происхождения галактик постулирует, что они образуются в результате случайных флуктуаций плотности в ранней Вселенной. Группы квазаров могут представлять такие области повышенной плотности.

**Н**А ОСНОВЕ наших исследований на Серро-Тололо попытаемся теперь описать, как выглядела Вселенная 12 — 15 млрд. лет назад. Вообразим, что наша Галактика входила в группу из четырех квазаров, которые по измерениям в современную эпоху имеют красные смещения 1,85. Если бы люди уже существовали в ту далекую эпоху, что они увидели бы на ночном небе? Прежде всего сам Млечный Путь был бы гораздо ярче, чем теперь, благодаря большому числу горячих молодых звезд. Четыре гипотетических квазара были бы хорошо видны невооруженным глазом как яркие звезды. Квазары, находящиеся за пределами нашей группы на расстоянии 300 млн. световых лет, также можно было бы видеть без телескопа. Очевидно, квазары были бы открыты и признаны загадочными объектами уже на ранних этапах развития астрономии. Как только появился бы телескоп, люди сразу же узнали бы, являются ли квазары интенсивно излучающими ядрами галактик или нет.

Следует помнить, что, как бы правдоподобно ни выглядели наши современные представления о квазарах, остается некоторая вероятность того, что они совершенно неверны, и еще большая вероятность того, что они неверны в важных деталях. Некоторые астрономы выражают сомнение, что квазары действительно так далеки, как указывают их красные смещения. Другие ставят под вопрос реальность высокой пространственной плотности квазаров при больших красных смещениях и предполагают, что квазары в действительности ярче или что их интенсивность усиливается в результате прохождения излучения вблизи галактик, лежащих на луче зрения и действующих как гравитационные линзы. В науке редко бывает (если вообще), чтобы большой объем

собранных данных был сразу же объяснен теоретически. Вероятно, так же дело обстоит и с квазарами. Сама проблема была бы менее увлекательной без рабочих гипотез. В любом случае вряд ли существующие

представления о квазарах будут кардинальным образом изменены в ближайшем будущем, без того чтобы эти объекты стали для нас еще более удивительными, чем были всегда.



ПОИСКИ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВАЗАРОВ ведутся потому, что она может способствовать более глубокому пониманию происхождения галактик в ранней Вселенной. На рисунке приведены двумерные аналоги шести различных возможных распределений. Если квазары сильно сгущиваются (а) или, напротив, избегают образования скоплений (б), то это очень легко обнаружить. Если же квазары проявляют лишь слабую тенденцию к сгущиванию (в) или избеганию скоплений (г), то может потребоваться тщательный статистический анализ, чтобы установить, что распределение является случайным и однородным. Два моделированных на ЭВМ случайных однородных распределений (д, е) показывают, что глазомерные оценки не всегда надежны.

# Суперкомпьютеры

*Компьютеры Cray-1 и CYBER 205 могут выполнять до 100 млн. арифметических операций в секунду. Столь невероятная скорость обработки числовой информации необходима для решения очень сложных задач, как, например, задачи гидродинамики*

РОНАЛЬД Д. ЛЕВАЙН

**В** НАСТОЯЩЕЕ время рынок заполнили так называемые домашние компьютеры, способные выполнять сотни арифметических операций в секунду. А сверхбыстродействующих суперкомпьютеров, делающих более 100 млн. операций в секунду, в мире сейчас насчитывается лишь около четырех десятков. Первая промышленная электронно-вычислительная машина VNIAC I, установленная в 1951 г. в Бюро переписи населения, работала примерно в три раза быстрее современных рядовых машин и в несколько тысяч раз превосходила их по размерам. С тех пор быстродействие больших компьютеров для научных исследований удваивалось в среднем каждые два года. Возрастание быстродействия привело к увеличению емкости памяти, необходимой для хранения данных и результатов. Новейшие модели суперкомпьютеров — это Cray-1 фирмы Cray Research, Inc. и CYBER 205, выпущенные фирмой Control Data Corporation.

Достигнутый уровень возможностей таких машин, безусловно, определяется успехами быстро развивающейся микроэлектроники, но в такой же степени он зависит и от новых концепций в архитектуре компьютеров. Под термином «архитектура» понимается логическая организация вычислительной машины, как ее представляет себе программист. Важнейшими из нововведений в архитектуре ЭВМ оказались те, которые позволили параллельно, или одновременно, выполнять множество похожих операций. Если на ЭВМ первых выпусков программисту приходилось разбивать решаемую задачу на ряд последовательно выполняемых элементарных шагов, то новейшие компьютеры позволяют при программировании выделить множество различных элементарных шагов, которые будут выполняться одновременно.

Что же это за задачи, требующие столь чудовищной вычислительной мощности, достигнутой новым поколением сверхбыстродействующих машин, и как их приспособить для параллельного решения? Широкий класс задач с большим объемом вычислений, который охватывает такие дисциплины, как аэродинамика, сейсмология, метеорология, атомная и ядерная физика, а также физика плазмы, можно отнести к области математического моделирования сплошных сред. Сплошную среду можно представить набором физических параметров, описывающим каждую точку некоторой трехмерной области. Численные значения параметров изменяются от точки к точке, и, как правило, под воздействием движущей силы они претерпевают изменения во времени. Параметрами могут быть, например, плотность, скорость и температура движущегося газа, напряжение в твердом те-

ле или составляющая электромагнитной силы.

Основные физические законы, действующие в сплошных средах, описываются системами дифференциальных уравнений в частных производных, которые на языке исчисления бесконечно малых связывают между собой значения и скорости изменения переменных в соседних точках среды. Строго математически можно доказать существование единственного решения такой системы уравнений при заданных начальных или граничных условиях — значениях переменных в начальный момент времени или на границе области. Точное решение полностью определяет поведение изучаемой материальной системы. Однако во всех реальных ситуациях, за исключением простейших, практически невозможно получить точное решение в явном виде. Поэтому приходится обращаться к численным методам, которые абсолютно точного результата не дают, но могут обеспечить нужную нам точность, правда, ценой увеличения объема арифметических вычислений.

**ТАК КАК** любая область пространства содержит бесконечное множество точек, то для полного описания материальной среды потребуется бесконечное число данных. Таким образом, разработку приближенного численного метода расчета следует начинать с дискретного описания рассматриваемой среды, введя сетку, состоящую из конечного множества точек или узлов, распределенных по всей области. Параметры среды будут принимать те или иные значения только в узлах сетки. Математически это означает, что система дифференциальных уравнений в частных производных при этом заменяется большой системой обычных алгебраических уравнений. Какое количество узлов сетки следует взять, отчасти зависит от числа пространственных переменных модели, а отчасти от сложности конфигурации рассматриваемой области и степени детализации, требуемой от решения.

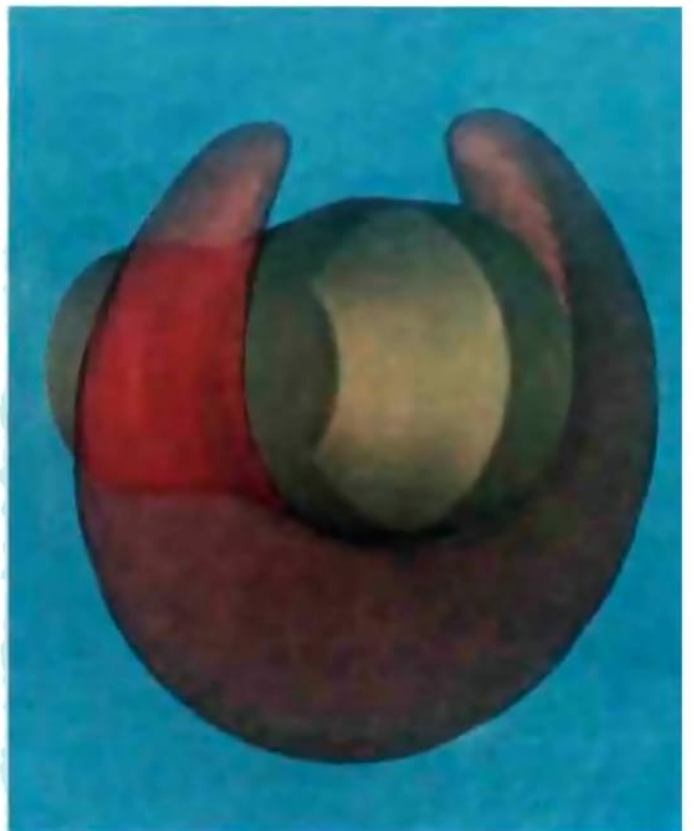
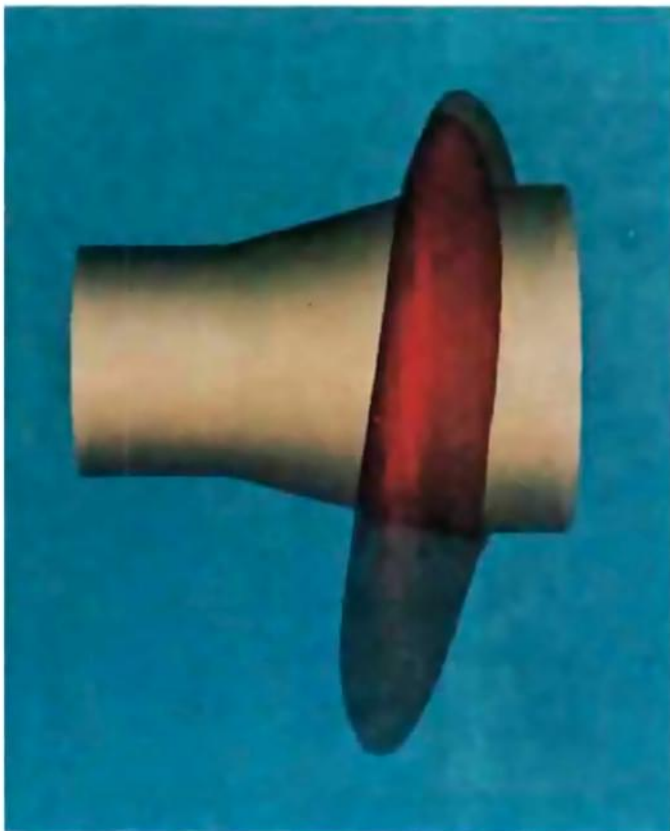
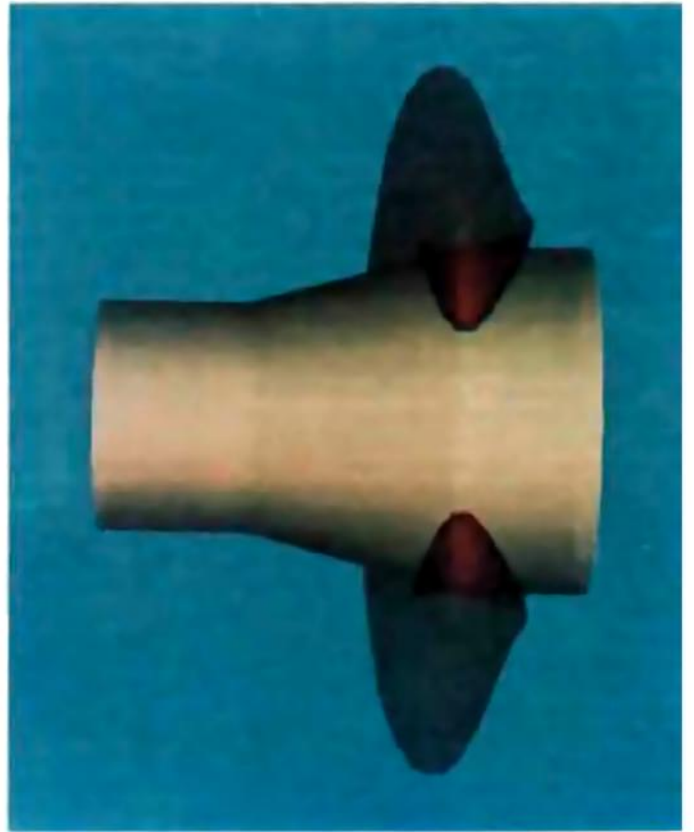
Для создания модели турбулентного аэродинамического потока в области относительно простой геометрии потребуются построение трехмерных сеток с числом узлов порядка одного миллиона, а для получения решения с удовлетворительной степенью детализации для инженерных целей в случае сложной геометрии, какую, например, имеет среда, окружающая весь летательный аппарат, число узлов достигает десятков миллионов. Для каждого узла сетки в памяти машины должен храниться и периодически обновляться в процессе вычислений ряд величин — по одной величине для каждого параметра среды, возможно несколько величин для описания геометрии и некоторые промежуточные результаты вычислений. В про-

граммах расчета трехмерных моделей аэродинамического потока на современных суперкомпьютерах предусматривается хранение в памяти машины от 5 до 30 величин для каждого узла сетки.

Расчет состоит из многократных повторений основного шага итерации, на котором новые значения переменных в каждом узле сетки вычисляются по старым значениям переменных в данном и соседнем с ним узлах. Итеративный подход при решении задачи при расчете среды в ее обычном устойчивом состоянии дает, как правило, наилучшее приближение к точному значению, если вычисления начинаются с задания разумных допустимых начальных условий во всех узлах сетки. Затем на каждом шаге расчета компьютер, используя исходные дифференциальные уравнения, вносит необходимую коррекцию, приближая описание среды к истинному.

Число итераций, необходимых для обеспечения заданной точности, в большой степени зависит от выбранного численного метода и может колебаться в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч. При моделировании среды, состояния которой меняются во времени, в качестве шагов итерации берут малые отрезки времени. На каждом шаге с помощью дифференциальных уравнений прогнозируются приближенные значения текущих параметров среды на короткий интервал времени вперед. Выбранные временные интервалы моделирования должны быть короче тех, которые требуются для заметных изменений состояний в самой среде, и по возможности они должны быть значительно короче, чтобы обеспечить заданную точность. При более близком размещении узлов сетки соответственно должны быть укорочены временные интервалы, с тем чтобы уменьшить чувствительность к ошибкам, которые неизбежно накапливаются из-за округления чисел в процессе расчета. Это накопление ошибок можно учитывать на каждом шаге вычислений. Из рассмотренного следует, что для получения приемлемого ответа число итераций должно быть как можно больше.

На каждой итерации для получения нового значения в каждом узле компьютеру приходится выполнять от 10 до 500 операций на единицу данных. Для решения некоторых современных прикладных задач аэродинамики и ядерной физики требуется выполнение не менее  $10^{13}$  арифметических операций, т.е. более двух дней машинного времени на одну задачу. Еще более крупные задачи требуют более мощных компьютеров. Авиационным инженерам, например, желательно получать модели потоков менее чем за один день, предпочтительно за один час или около того. Более жесткими временными рам-



ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОТОКА дают представление о поведении воздушной среды, обтекающей поверхность «кормовой» части ракеты, там где она сужается на конус к отсеку с двигателем. Модель ракеты «летит» со скоростью чуть ниже звуковой. Моделирование поведения аэродинамического потока в критической области кормовой части — одна из последних задач, выполненных на ILLIAC IV в исследовательском центре (Ames Research Center) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства, Морфетт-Филд, шт. Калифорния (перед демонтированием этого компьютера в 1981 г.). Процесс моделирования воздушного потока с помощью сетки из четверти миллиона узлов вокруг кормовой части ракеты потребовал 18 ч машинного времени, в течение которого ILLIAC IV выполнял примерно  $10^{11}$  арифмети-

ческих операций. Результаты вычислений хорошо согласуются с данными, которые можно получить, помещая модель ракеты в аэродинамическую трубу. На четырех выданных компьютером изображениях показана область, где воздушный поток достигает скорости звука. Кормовая часть представлена снизу (*вверху слева*), сверху (*вверху справа*), сбоку (*внизу слева*) и под углом  $45^\circ$  (*внизу справа*). Вычисления проводились под руководством Дж. Дейворта (Ames Research Center). Программы для получения изображений разработаны Дж. К. Кларком из Станфордского университета и написаны Ф. Мастоном (Silicon Graphics System Incorporated) и К. Люткмером (Ames Center). Другие изображения, полученные аналогичным моделированием, приведены на последнем рисунке (см с. 28).

ками ограничены метеорологи, предсказывающие погоду.

При моделировании на компьютере сплошных сред, а также при решении многих других сложных научных задач вычислительный процесс можно разбить на ряд независимых частей, выполняемых одновременно. При этом, конечно, существуют определенные ограничения. Очевидно  $n + 1$  итерация не может выполняться одновременно с  $(n + 1)$ -й, поскольку выходные результаты первой служат входными данными для второй. Для расчета сплошных сред, однако, возможность одновременного выполнения операций следует из локального характера дифференциальных уравнений, по которым расчет значений параметров в узлах производится однотипно. Другими словами, если используется определенная последовательность операций для описания изменения параметров сплошной среды в заданном узле в интервале времени от  $t$  до  $t + 1$ , то точно такая же последовательность операций может быть применена одновременно для каждого другого узла или для всех узлов сетки, или по крайней мере ко всем точкам плоского сечения. Поскольку операции, соответствующие различным узлам, независимы, они могут выполняться параллельно. В настоящее время, когда появилось новое поколение суперкомпьютеров и новые языки программирования, прилагаются немалые усилия к пересмот-

ру вычислительных алгоритмов больших задач, для того чтобы максимально увеличить число одновременно выполняемых операций.

При рассмотрении скорости суперкомпьютера часто используется понятие «мегафлоп» (1 млн. операций с «плавающей точкой» в секунду). «Плавающая точка» относится к двоичной версии хорошо известного в научной практике метода представления чисел, когда число записывается в виде произведения, в котором один множитель (мантисса) имеет величину между 0.1 и 1, а другой (характеристика) является степенью 10. Так, 6600 можно записать как  $0.66 \times 10^4$ , а 66 — как  $0.66 \times 10^2$ . Такое представление удобно в научных расчетах, поскольку часто диапазон значений величин, входящих в задачу, бывает довольно большим. В компьютерах принята двоичная форма представления чисел с плавающей точкой. Здесь характеристики выражены в двоичной системе счисления и состоят из последовательности нулей и единиц.

К операциям с плавающей точкой относятся сложение, вычитание, умножение или деление двух операндов; в результате также получаются числа с плавающей точкой. Выполнение таких операций требует несколько большего машинного времени, чем соответствующие действия над числами с фиксированной точкой или целыми числами. В современных компьюте-

рах длительности выполнения первых трех операций примерно совпадают; деление несколько медленнее, но программу можно написать так, чтобы деление использовалось лишь в редких случаях. При измерении скорости ЭВМ в мегафлопах время, затрачиваемое на извлечение операндов из памяти и запись результатов в память, входит в продолжительность операций.

**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**, выраженную в мегафлопах, следует определять, учитывая точность, с которой выполняются операции, т.е. максимальное число значащих разрядов, определенных длиной машинного слова. Суперкомпьютеры рассчитаны на обработку длинных слов, обычно в 64 бит (двоичных разряда). В таком слове 49 бит, как правило, отводится под мантиссу и ее знак (плюс или минус), а остальные 15 бит — под показатель степени и его знак. Это позволяет представлять числа от  $10^{-2466}$  до  $10^{2466}$  с точностью, соответствующей 15 десятичным разрядам. Необходимость в такой большой точности может показаться сомнительной, поскольку точность научных измерений почти всегда на много порядков ниже. Тем не менее во многих алгоритмах неизбежны небольшие ошибки, появляющиеся в каждой операции округления, накапливаются после сотен тысяч итераций до неприемлемо большой ошибки в



КОМПЬЮТЕР CRAY-1 (слева) фирмы Cray Research, Inc. — это одна из двух поступающих сегодня в продажу машин с максимальной производительностью не менее 100 млн. арифметических операций в секунду. На фотографии представлена модель, недавно установленная в Ames Research Center, где до этого работал ILLIAC IV. Большая из двух стоек, изображенных на переднем плане, — это основная часть компьютера, в которой расположены центральный процессор и центральная память. Меньшая стойка — подсистема ввода/вывода, состоящая из трех ма-

лых быстродействующих машин и дополнительных устройств памяти. В выступающей части основания большой стойки находится блок питания. На фотографии справа показаны задние панели стоек, где видно переплетение проводников, которые соединяют более 1600 схемных плат центрального процессора. Проводники, общее число которых около 300 тысяч подобраны по длине таким образом, чтобы сигналы проходили между любыми двумя точками за требуемый интервал времени с разбросом не более 1 нс ( $10^{-9}$  с). Рабочий цикл машины равен 12,5 нс.

окончательном результате, если при выполнении отдельных операций не поддерживается очень высокая точность. С другой стороны, многие алгоритмы устойчивы по отношению к ошибкам округления и при их использовании можно ограничиться меньшей точностью. По этой причине желательно, чтобы в суперкомпьютере общего назначения существовала возможность выбора режима половинной точности, который обеспечивал бы в некоторых задачах вдвое большую производительность для вычислений с плавающей точкой при удвоенном объеме доступной рабочей памяти.

Нельзя оценить скорость или производительность конкретного компьютера в мегафлопах, не принимая во внимание характер используемой программы. Быстродействие зависит от объема вычислений, которые можно выполнять одновременно, от того, насколько этот объем может быть реализован в параллельном режиме компьютера, а также в большой степени от мастерства программиста. Быстродействие свыше 100 мегафлопов, о котором говорят фирмы, производящие суперкомпьютеры, представляет собой предел возможностей, достижимый лишь в отдельные моменты и при условиях, возникающих в реальной обстановке только случайно. Среднее быстродействие в мегафлопах, с которым полностью обрабатывается машиной обычная программа, бывает всегда ниже рекламируемого максимального значения и в большой степени зависит от программы.

В настоящее время суперкомпьютерами принято считать машины, среднее быстродействие которых для типичных итеративных задач с базой данных в 1 млн. слов и более составляет 20 мегафлопов. Производительность предназначенного для больших научно-исследовательских работ компьютера CDC 7600 фирмы Control Data (эта самая удачная модель 70-х годов) может достигать самое большее пяти мегафлопов, и то лишь при решении наименее сложных задач. Первой машиной с производительностью, достигающей 20 и более мегафлопов, была уникальная машина ILLIAC IV, разработанная группой Д.Л. Слотника в Иллинойском университете и выпущенная в конце 60-х — начале 70-х годов фирмой Burroughs Corporation [финансирование этой разработки осуществляло Управление перспективного планирования научно-исследовательских работ (ARPA) министерства обороны]. В 1972 г. ILLIAC IV был установлен в исследовательском центре Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА), где этот компьютер успешно решал некоторые самые сложные аэродинамические задачи, которые когда-либо программировались, до тех пор пока не был списан в сентябре 1981 г.

После демонтажа ILLIAC IV только два семейства суперкомпьютеров готовы к промышленной эксплуатации и предлагаются к продаже. Одно из них — это компьютеры серии Cray-1, созданные фирмой Cray Research, другое — компьютеры CYBER 205 фирмы Control Data. Первый экземпляр Cray-1 был установлен в исследовательской лаборатории в Лос-Аламосе в 1976 г. В настоящее время тридцать четыре машины Cray-1 эксплуатируются в различных центрах. Первый полностью оснащенный CYBER 205 был доставлен в Метеорологическую службу Великобритании в 1981 г. Несколько дру-



CYBER 205 фирмы Control Data Corporation, конкурирующий с Cray-1. Изображенное здесь устройство проходит окончательные испытания на заводе фирмы в Арден-Хиллсе (шт. Миннесота). Стоимость CYBER 205, так же как и Cray-1, составляет от 10 до 15 млн. долл. в зависимости от поставляемого объема памяти и другого дополнительного оборудования. Первый CYBER 205 был поставлен в Метеорологическую службу Великобритании в 1981 г. Использование численных методов в предсказании погоды вызвало необходимость развития суперкомпьютеров, которое началось с создания MANIAC (Mathematical Analyzer, Numerical Integrator and Computer), разработанного в конце 1940 г. под руководством Джона фон Неймана. Компьютер CYBER 205 представляет собой усовершенствованный вариант машины STAR 100 фирмы Control Data и имеет длительность цикла 20 нс. Поскольку Cray-1 — очень компактное устройство, сигналы в нем могут передаваться от одной точки к другой со скоростью, обеспечиваемой медным проводником, т.е. примерно 0,3 скорости света. Чтобы уменьшить время прохождения сигналов в CYBER 205, который имеет значительно большие размеры, разработчики предусмотрели соединение нескольких тысяч схемных плат коаксиальными кабелями, по которым сигналы распространяются со скоростью, примерно равной 0,9 скорости света.

гих машин этой серии было закуплено правительственными и университетскими лабораториями и двумя нефтяными компаниями. CYBER 205 представляет собой усовершенствованный вариант машин STAR 100 фирмы Control Data, четыре из которых были созданы в начале 70-х годов. Три экземпляра промежуточной модели, CYBER 203, были проданы в позапрошлом году, до того как появился CYBER 205. Характеристики модели 203 будут, вероятно, улучшены до характеристик модели 205, и поэтому различия между ними не представляются интересными.

**Н**и Cray-1, ни CYBER 205, безусловно, не обладают большим быстродействием, чем ILLIAC IV. Каждая из трех машин является (или являлась) наилучшей для решения определенного класса научно-исследовательских задач. Поскольку ILLIAC IV был единственным в своем роде, его создание обошлось примерно в 40 млн. долл., что намного превысило стои-

мость двух других моделей. Обслуживание компьютера ILLIAC IV обходилось также дорого — около 2 млн. долл. в год. Закупочные цены на суперкомпьютеры фирм Cray и Control Data составляют от 10 до 15 млн. долл. в зависимости от памяти, периферийного оборудования и другой комплектации. Эти фирмы являются конкурентами на мировом рынке по продаже суперкомпьютеров, выпуск которых в текущем пятилетии составит от 100 до 200 машин. Более того, обе фирмы планируют выпуск новых моделей с улучшенными характеристиками в течение того же периода. К 1985 г., если не раньше, некоторые лаборатории, финансируемые правительствами и фирмами в США и в Японии, возможно, также продемонстрируют суперкомпьютеры, превосходящие по своим параметрам современные машины фирм Cray и Control Data.

Увеличение быстродействия компьютеров в два и в четыре раза за последние годы оказалось возможным в большой сте-



ОСНОВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОМПЬЮТЕРА являются два процессора, которые выполняют большой объем арифметических и логических операций, и пассивное устройство памяти для хранения команд и результатов вычислений. В самом начале в память загружаются все команды, из которых состоит программа. Процессор команд выбирает их в той последовательности, которая предусмотрена программой, и передает процессору обработки данных. Результаты заносятся в память и вновь извлекаются, если они необходимы для последующих этапов расчета в процессе выполнения программы.

пени благодаря постоянному уменьшению размеров микроэлектронных схем. Число транзисторов, которое может быть размещено на кремниевом чипе со стороны, измеряемой в сантиметрах, возросло примерно с десяти в начале 60-х годов до нескольких тысяч в начале 70-х годов, а в настоящее время достигает нескольких сотен тысяч. Эти успехи в полупроводниковой технологии впервые позволили создать относительно недорогие быстродействующие запоминающие устройства огромного объема. ILLIAC IV был первым компьютером высокого уровня, в котором быстрая центральная память была реализована на чипах, а не на матрицах из ферритовых сердечников с намоткой из очень тонкой проволоки. Уровень плотности чипов памяти компьютера ILLIAC IV теперь называется средним уровнем интеграции (MSI); емкость одного чипа составляла 256 бит. По современным стандартам общий объем полупроводниковой памяти был невелик: 131 072 слова (длина каждого слова — 64 бит). В центральной памяти Cray-1 и CYBER 205 используются элементы с высоким уровнем интеграции (LSI), который обеспечивает плотность, равную 4 096 бит на чип. Обе машины могут комплектоваться быстродействующими запоминающими устройствами, способными хранить до 4 194 304 слов длиной 64 бит. Устройства памяти реализованы на быстрых биполярных кремниевых транзисторах. Такая технология известна как логика с эмиттерными связями. Стоимость памяти составляет около 1 долл. за слово.

Другое положительное свойство возросшей плотности схем заключается в уменьшении времени цикла выполнения каждой логической операции. Цифровые компьютеры представляют собой устройства с дискретным временем: один или более датчиков времени выдают импульсы через фиксированный интервал, называемый временем цикла, или тактом машины. Состояние машины, под которым понимается мгновенное содержимое

всех ее регистров, т.е. основных ячеек памяти, однозначно определяется в каждый момент, отмечаемый датчиком времени. Изменение состояния между этими моментами зависит от входной информации. Иначе говоря, элементарные процессы в компьютере не могут протекать быстрее, чем за время цикла, и разработчик пытается по возможности его сократить.

Одним из ограничений на величину времени цикла является время срабатывания вентилярных схем, т.е. элементарных переключателей, из которых монтируется компьютер. В течение многих лет основной фактор, ограничивающий время цикла, обуславливался задержками вентилярных схем. В первых машинах на электронных лампах время цикла было около 10 000 нс ( $10^5$  с). С появлением транзисторной техники время цикла уменьшилось примерно до 100 нс. Интегральные схемы позволили уменьшить время цикла почти до 1 нс ( $10^{-9}$  с). Разрабатываемые в настоящее время методы позволяют достигнуть временных характеристик, намного меньших 1 нс, но эти методы еще нужно научиться применять ко всем компьютерам.

**КОГДА** временные задержки вентилярных схем уменьшились до 1 нс, возникло новое препятствие для достижения минимального времени цикла — скорость передачи сигнала внутри машины. Ни один сигнал не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света, т.е. 0.3 м/нс. В действительности скорость передачи импульсов по электрическим цепям суперкомпьютеров находится в интервале до 0.1—0.28 м/нс. Следовательно, для уменьшения времени цикла до 1 нс необходимо ограничить расстояние, отделяющее синхронно работающие блоки машины, до величины, намного меньшей 0.3 м. Возрастание плотности интеграции схем привело к созданию совсем крошечных устройств, таких, как микропроцессоры (фактически по-

льные компьютеры на одном чипе). Несмотря на это, миниатюризации суперкомпьютеров препятствуют громадные размеры памяти и большое число логических схем, без которых они не могут обойтись. Время цикла ILLIAC IV составляло 80 нс, а CYBER 205 и Cray-1 имеют время цикла соответственно 20 и 12.5 нс. Длительность циклов этих трех машин примерно пропорциональна их линейным размерам: еще один довод в пользу того, что скорость передачи сигнала — ограничивающий фактор.

Концентрация огромного числа электрических схем в малом объеме с целью минимизации длины проводников создает серьезную проблему отвода избытка теплоты, выделяемой при преобразовании электроэнергии. Потребляемая мощность логических элементов на быстрых биполярных транзисторах довольно ощутима — почти 5 Вт на чип, а Cray-1 содержит около 300 000 чипов в объеме менее 2.8 м<sup>3</sup>. Отвод теплоты представляет собой критическую проблему, поскольку степень отказов полупроводников быстро возрастает с температурой. ILLIAC IV охлаждался мощным потоком холодного воздуха, который подавался снизу. В компьютерах Cray-1 и CYBER 205 тепловая энергия отводится при помощи сжатого фреона, пропускаемого по каналам охлаждения. В компьютерах Cray-1 отдельные платы схем, каждая из которых имеет размеры 15 x 23 см с размещенными на ней несколькими десятками чипов, смонтированы на цельных медных пластинах. С двух сторон их плотно сжимают массивные вертикальные алюминиевые листы, по которым циркулирует охлаждающее вещество. В CYBER 205 трубки охлаждающей системы встроены прямо в печатные платы, и каждый блок чипов плотно прилегает к трубке охлаждения при помощи пружинного зажима. Цифровые схемы служат источником ошибок из-за неисправности их компонент и случайных электрических помех. Даже несмотря на то, что надежность чипов возросла, вместе с эволюцией суперкомпьютеров растет уровень ошибок, так как в сложных системах этот показатель пропорционален числу их частей. Для того чтобы оградить пользователя от выдачи неверных результатов, в суперкомпьютерах применяют математические коды, позволяющие обнаружить и исправить ошибки. Это достигается добавлением к слову требуемой минимальной длины избыточных информационных битов. Математические методы, первоначально разработанные Ричардом В. Хэммингом в Bell Laboratories в 1950 г., позволили эффективно добавлять избыточные биты. Например, при добавлении 8 бит к слову длиной в 64 бит можно обнаружить все двухбитовые ошибки и обнаружить и исправить все однобитовые. Системами генерации и проверки избыточных битов следует снабдить схемы проверки ошибок разных устройств компьютера. Все суперкомпьютеры современного поколения включают такие схемы проверки ошибок. Отсутствие этих схем в ILLIAC IV, а также его более подверженное ошибкам аппаратное обеспечение постоянно усложняли работу. Конечно, средства проверки ошибок заметно влияют на стоимость машины и вовсе не исключают возможности появления необнаруженных ошибок (в 3 бит и более), тем не менее их процент снижается до приемлемых уровней.

**П**РЕЖДЕ чем перейти к рассмотрению архитектуры компьютера, остановимся кратко на основных его функциях. Компьютер состоит в сущности из трех частей: памяти, процессора команд и процессора обработки данных. (Для простоты исключим рассмотренные системы ввода/вывода, которая обеспечивает связь с внешней средой.) Память содержит как массивы данных, так и команды; обращение к отдельным ячейкам памяти производится при помощи соответствующих им адресов. Каждый элемент данных, хранимый в памяти машины, — это, по сути, операнд, т.е. то, над чем можно производить математические действия; к данным относятся и результаты, полученный в процессе предыдущих вычислений. Команды закодированы в виде последовательности битов, которые однозначно определяют выполнение операций и указывают адреса для обращения к памяти. Команды организуются в программы.

Набор команд, или аппаратно-реализованных операций, закладывает фундамент архитектуры. Процессор команд извлекает команды из памяти, декодирует их и передает полученные последовательности управляющих сигналов и адресов процессору обработки данных и памяти, обеспечивая выполнение закодированных операций. Чаще всего следующей выполняется команда, которая находится непосредственно за текущей командой в памяти. Однако лишь немногие программы представляют собой простую линейную последовательность команд. Как правило, в программах имеются циклы (последовательности команд для многократного повторения) и точки условных переходов. В этих точках следующая выполняемая команда выбирается из двух или более вариантов в зависимости от полученного результата, который программист не всегда может предсказать.

В обычных последовательных компьютерах каждая команда может обращаться только к малому числу операндов. В самом деле, наиболее популярна архитектура, в которой предусмотрен только один адрес памяти в каждой команде. Для извлечения команды из памяти и декодирования в процессоре команд требуется несколько тактов машины. На фазу выполнения команды уходит несколько циклов для обращений к памяти и еще несколько циклов для арифметической операции. В ранних моделях процессор команд бездействовал во время выполнения команды. Вскоре было замечено, что если заставить процессор команд извлекать следующую команду в то время, когда процессор обработки данных выполняет текущую, то можно сэкономить несколько циклов. При этом следует предусмотреть, чтобы время обращения двух процессоров к памяти не совпадало. Такая процедура послужило толчком для развития концепции «поточной обработки», которая в настоящее время доминирует в так называемых векторных компьютерах.

Для программиста вектор — это лишь упорядоченный список данных, элементы которого должны быть занесены в память неким стандартным способом. Число элементов списка называется длиной вектора (в отличие от более известного определения длины вектора в математике и физике). Для любой операции, выполняемой над одним операндом (например, извлечение квадратного корня), существует

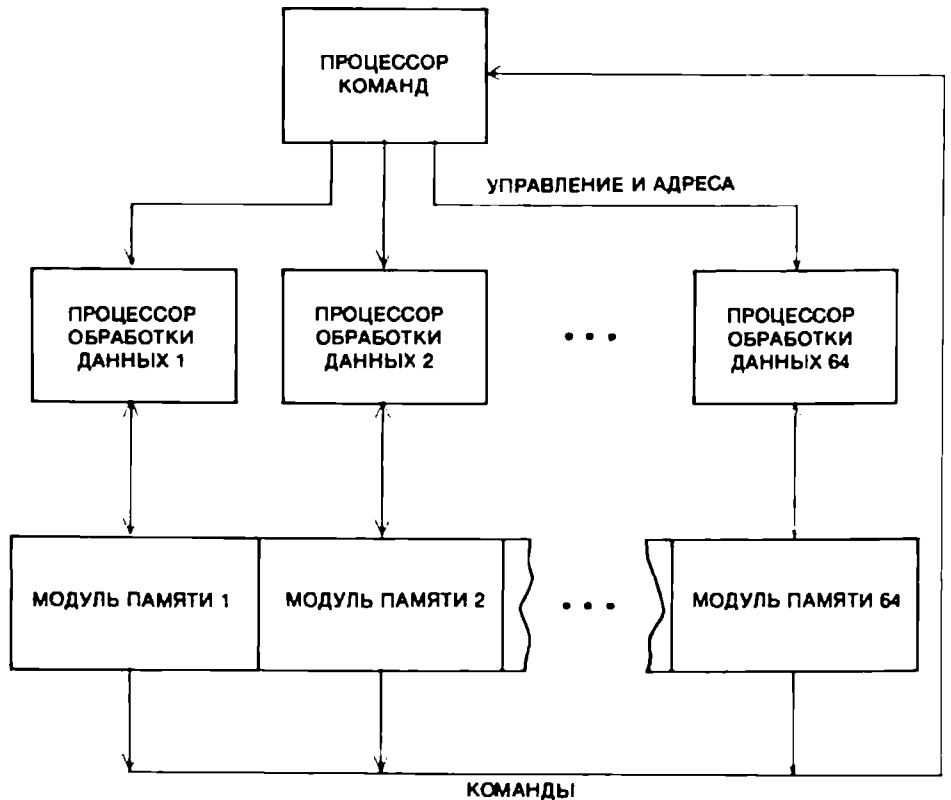
соответствующая векторная операция, представляющая собой использование той же операции для каждого элемента вектора. Аналогично для любой операции, которая может быть выполнена над парой операндов, имеется соответствующая векторная операция, представляющая собой применение той же операции к паре элементов, выбираемых по порядку из двух векторов одинаковой длины. Обычные арифметические операции, выполняемые над отдельными числами или парами чисел, иногда называют скалярными для того, чтобы отличить их от векторных операций.

**Д**ЕЙСТВИЕ векторных компьютеров, включающих все суперкомпьютеры, основано на некоторых стратегиях ускорения выполнения векторных операций. Одна из этих стратегий — включение векторных команд в общий набор команд. Реализация одной векторной команды приводит к выполнению всех операций над парами чисел, из которых складывается полная векторная операция. Таким образом, помимо операции в векторной команде указываются начальные адреса двух векторных операндов, реализующего вектора и их общая длина. Для увеличения быстродействия более важно аппаратно обеспечить одновременное выполнение большого числа операций над парами чисел, составляющих векторную операцию. Эти сопутствующие друг другу средства в основном делятся на два класса: поточ-

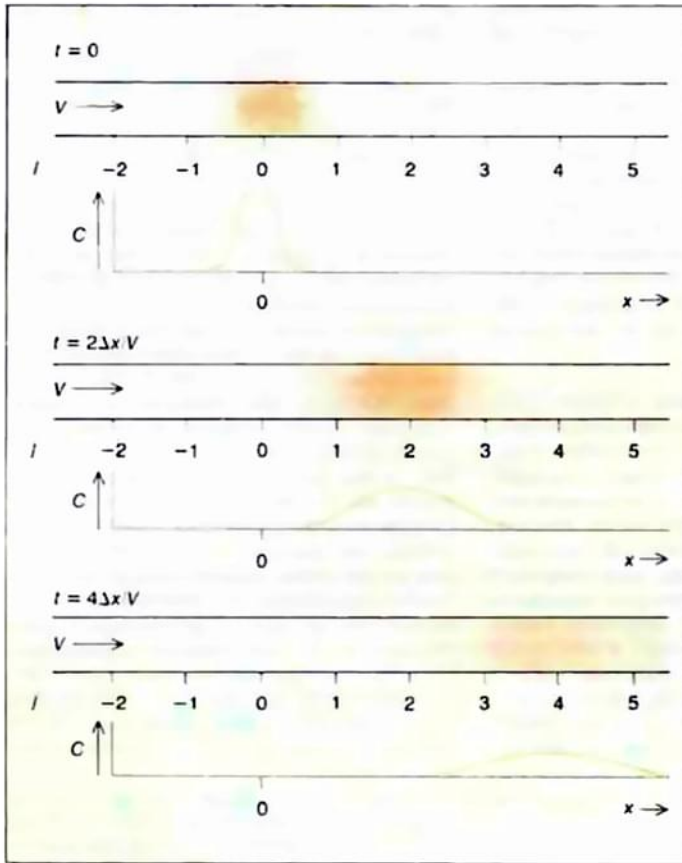
ную обработку и мультипроцессорную обработку.

Компьютер ILLIAC IV воплощал примитивную форму мультипроцессорной обработки. Он имел 64 идентичных процессора обработки данных, которые согласованно работали под управлением одного процессора команд. Память разделялась на 64 модуля, каждый из которых предназначался для одного процессора обработки данных. Элементы вектора размещались в соответствующих ячейках различных модулей памяти. Поэтому оптимальная длина вектора для ILLIAC IV равнялась 64 бит, благодаря чему векторные операции выполнялись примерно в 64 раза быстрее, чем обычные скалярные операции. Более длинные векторные операции делились на сегменты длиной по 64 бит, и они выполнялись в программном цикле, как это имеет место в машинах последовательного действия. Для более коротких векторов (или для остатка от деления на 64 длинного вектора) некоторые процессоры обработки данных могли выключаться. В обоих случаях производительность в мегафлопах снижалась. ILLIAC IV функционировал как 128-процессорный компьютер, если можно было сократить длину слова до 32 бит и обеспечить при этом удовлетворительную точность.

Обработку поточным способом можно сравнить с промышленной сборочной линией, где производимая продукция поступает на ряд рабочих мест. На каждом ра-



**ОРГАНИЗАЦИЯ ILLIAC IV** — единственного в своем роде суперкомпьютера, разработанного в вычислительном центре Иллинойского университета в конце 1960 г. — включала один управляющий процессор команд и 64 независимых процессора обработки данных, каждому из которых соответствовал свой модуль памяти. При такой структуре машина могла одновременно выполнять 64 связанные между собой вычислительные операции. Существует большой класс задач в метеорологии, аэродинамике и других областях, которые решаются таким методом одновременных вычислений. В решении самых объемных задач ILLIAC IV до сих пор остается непревзойденным. Это был первый большой компьютер с памятью на полупроводниковых элементах.



ПРИМЕРОМ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ в суперкомпьютере, может служить исследование потока жидкости (слева). В длинном узком канале или трубке протекает слева направо с одинаковой скоростью  $V$  жидкость, содержащая локализованные капли загрязненной жидкости (закрашено). Загрязнение переносится окружающим потоком (конвекция) и к тому же распространяется внутри него вследствие беспорядочного молекулярного движения (диффузия). Под каждым изображением канала показан график зависимости концентрации  $C$  загрязнения как функции расстояния вдоль канала. Математическая задача заключается в получении уравнений, определяющих значение  $C$  в каждой точке  $x$  в любой момент времени  $t$ . Узлы решетки  $j$  и расстояние  $\Delta x$ , на котором они находятся друг от друга, служат элементами дискретного описания задачи для решения на вычислительной машине. Значение  $\Delta x$  должно быть достаточно небольшим, чтобы обеспечить нужную пространственную разрешающую способность. Динамику жидкого потока можно описать уравнением в частных производных, известным как уравнение переноса (справа, а). Концентрация загрязнения изменяется от точки к точке и в каждой точке зависит от времени. Первый член в уравнении есть скорость изменения  $C$  во времени. Второй член выражает результат конвекции;  $V$  — скорость потока, а частная производная является градиентом концентрации. Следовательно, это скорость изменения

a

ЧЛЕН, УЧИТЫВАЮЩИЙ  
КОНВЕКЦИЮ

$$V \frac{\partial C}{\partial x}$$

ПРОИЗВОДНАЯ СКОРОСТИ ПО ВРЕМЕНИ ПОТОКА  
ГРАДИЕНТ КОНЦЕНТРАЦИИ

ЧЛЕН, УЧИТЫВАЮЩИЙ  
ДИФФУЗИЮ

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

ВТОРАЯ ПРОИЗВОДНАЯ КОНЦЕНТРАЦИИ  
КОНСТАНТА ДИФФУЗИИ

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[ V \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \left[ D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] = 0$$

b

$x \rightarrow j\Delta x \quad j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$t \rightarrow n\Delta t \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$C \rightarrow C_j^n$

c

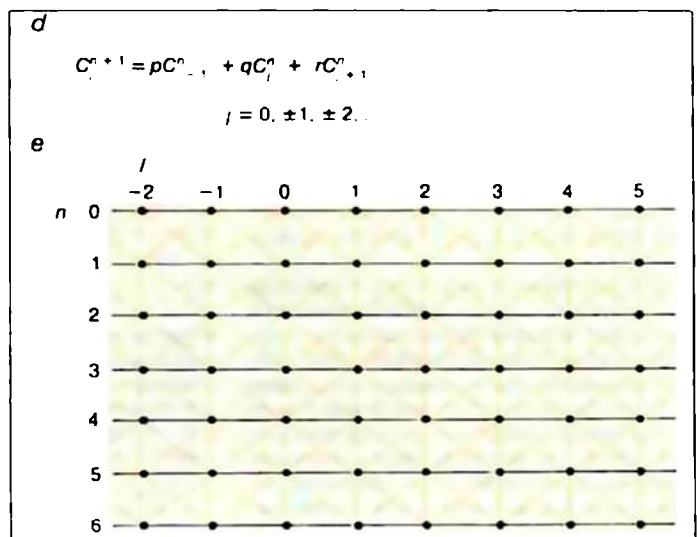
$$\frac{\partial C}{\partial t} \rightarrow \frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} \rightarrow \frac{C_j^n - C_{j-1}^n}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \rightarrow \frac{C_{j+1}^n - C_j^n}{\Delta x} - \frac{C_j^n - C_{j-1}^n}{\Delta x}$$

концентрации в зависимости от местоположения в трубке. Третий член характеризует диффузию.  $D$  — константа, отражающая диффузионные свойства двух жидкостей, а частная производная второго порядка есть градиент изменения концентрации. Далее, непрерывная функция заменяется дискретной аппроксимацией (b). Задан небольшой временной интервал  $\Delta t$ , концентрация рассматривается только в узлах  $j$  в моменты времени  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ . Член  $C_j^n$  обозначает концентрацию в узле сетки  $j$  на  $n$ -м временном интервале. Для решения задачи на машине должны быть заданы левая и правая границы индекса  $j$ . В данном случае достаточно проводить вычисления до области, в которой концентрация близка к нулю. Объем вычислений, необходимых для расчета поведения жидкости в заданном временном интервале, зависит от значения  $\Delta t$ . Точность решения повышается с уменьшением  $\Delta t$ , но объем вычислений при этом увеличивается. На следующем этапе (c) каждая частная производная заменяется «наилучшим приближением», полученным по значениям в узлах пространственно-временной сетки. В каждом случае наилучшее приближение есть отношение, в котором знаменатель — временной или пространственный шаг вдоль сетки, а числитель — разность величин, полученных для смежных узлов сетки. В частности, для второй производной знаменатель есть разность между членами, которые сами представляют собой аналогичные отношения.

ЗАДАЧА КОМПЬЮТЕРА заключается в решении большой системы линейных уравнений (d), полученных при помощи дискретной аппроксимации. После алгебраических упрощений получим уравнение для каждого значения  $j$ , которое описывает концентрацию в точке  $j$  в момент времени  $n+1$  по значению концентрации в предыдущий момент времени  $n$  в точке  $j$  и в двух соседних точках  $j-1$  и  $j+1$ . Величины  $p, q$  и  $r$  — константы, зависящие от  $V, D, \Delta x, \Delta t$  и не зависящие от  $j$  и  $n$ . Для перехода к каждому последующему временному интервалу компьютер должен выполнить 5 операций с плавающей точкой на каждый узел сетки — три умножения и два сложения. («Плавающая точка» относится к системе счисления, в которой числа записываются при помощи степеней 10.) Диаграмма пространственно-временной сетки (e) показывает связь между значениями параметров в узлах сетки. Для вычисления значения параметра в каждой точке необходимо, чтобы на входе имелись данные, соответствующие цветным стрелкам, направленным к вычисляемой точке. (Начальное значение концентрации для  $n=0$  и каждого значения  $j$  предполагается заданным.) Все  $j$ -е величины для каждого значения  $n$  могут в принципе вычисляться параллельно, или одновременно, потому что не существует зависимых связей между узлами на одном и том же временном уровне. Значения уровня можно вычислить после получения данных на предыдущем временном интервале. Поскольку расчет во всех узлах проводится аналогично, параллельные вычисления можно запрограммировать в векторном виде.





бочем месте выполняется один шаг производственного процесса, и на всех рабочих местах в одно и то же время обрабатываются различные изделия на всевозможных стадиях. Сложение с плавающей точкой, например, выполняется за несколько последовательных шагов. Сумматор поточного действия для чисел с плавающей точкой делится на сегменты, каждый из которых производит работу, исполняемую за один машинный такт. В конце машинного такта каждый сегмент передает свой результат следующему и принимает промежуточные результаты от предыдущего. Таким образом, после того как число машинных тактов, истекших с начала работы сумматора поточного действия, станет равно числу его сегментов, сумматор сможет выдавать в каждый машинный такт по одному результату суммирования с плавающей точкой до тех пор, пока в каждый такт машины к первому сегменту подается новая пара операндов. Архитектура Cray-1 и CYBER 205 использует в основном поточную организацию обработки и дополнительно мультипроцессорный режим.

**О**РГАНИЗАЦИИ памяти компьютера в течение долгих лет уделялось много внимания. Существуют два метода расчленения памяти — вертикальный и горизонтальный. Причина структуризации памяти вертикальным (или иерархическим) способом заключается в том, что один бит быстрой памяти дороже одного бита более медленной. Кроме того, чем больше емкость памяти, тем больше требуется времени на доступ к элементам данных, которые запомнились произвольным образом. Устройства обработки в самых больших компьютерах имеют непосредственную связь с малой очень быстрой памятью (всего лишь, возможно, в несколько сотен слов, доступ к которым может осуществляться в течение одного машинного такта). Эта память часто называется набором регистров и во многих случаях относится к устройству обработки.

На следующей ступени иерархии находится большая быстрая память, называемая центральной, или основной. Во время решения итеративных задач в нее записываются основные части программы и базы данных. В некоторых моделях вычислительных устройств предусмотрено наличие кэш-памяти, содержащей до нескольких тысяч слов и занимающей промежуточное положение между набором регистров и основной памятью.

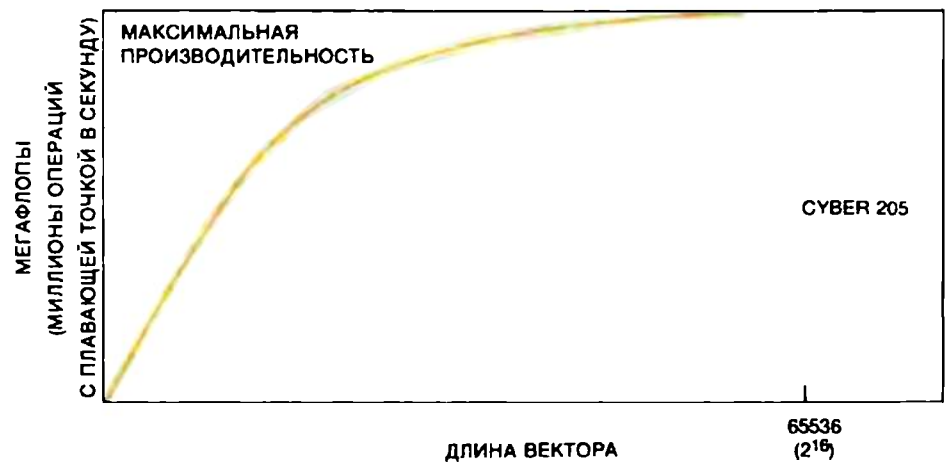
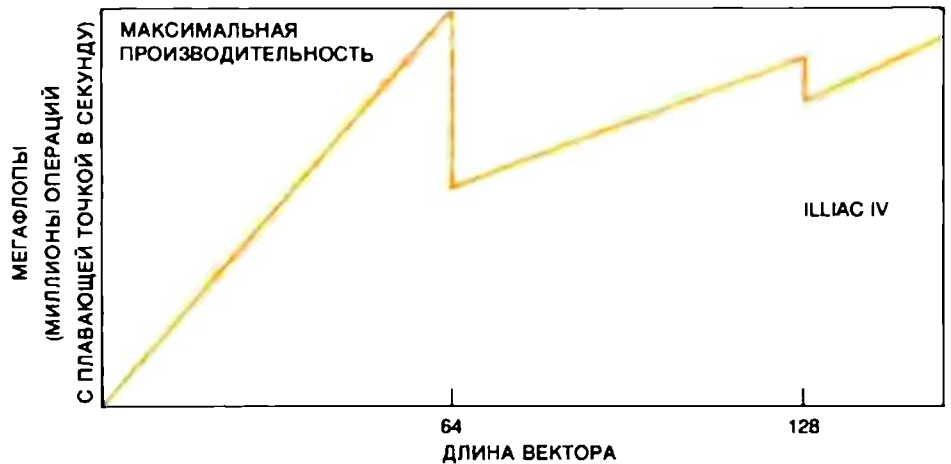
На самом нижнем уровне иерархии находится относительно медленная, но вместительная вторичная память, обычно размещенная на блоках вращающихся магнитных дисков. И Cray-1, и CYBER 205 имеют одинаковые высокоэффективные устройства памяти на дисках фирмы Control Data, которые содержат около 77 млн. слов. Обе машины могут быть снабжены набором таких устройств с общим объемом, превышающим 1 млрд. 64-битовых слов. Максимальная скорость обращения к одному дисковому устройству для записи или считывания равна полу-миллиону слов в секунду, а на практике возможно одновременно поддерживать информационный обмен между центральной памятью и несколькими устройствами памяти на магнитных дисках.

Максимальная скорость передачи информации в память (или из памяти) известна как ширина полосы. Чтобы сред-

няя скорость вычислений не зависела от меньшей ширины полосы памяти низших уровней, в программах должна быть предусмотрена возможность выполнения наибольшего числа операций с командами и данными на высших уровнях, прежде чем возникнет необходимость перезагрузки с более низкого уровня. Как мы увидим, это важно учитывать при программировании векторных операций для компьютера Cray-1. Малая ширина полосы его центральной памяти может отразиться на эффективности в мегафлопах — той, кото-

рая достигается для данных, хранящихся в наборе регистров.

Вторичная память на магнитных дисках как в Cray-1, так и в CYBER 205 слишком медленна, чтобы обеспечить удовлетворительное решение задач моделирования сплошных сред, база итеративных данных которых столь велика, что не помещается в центральной памяти машины. ILLIAC IV обладал уникальной памятью на магнитных дисках, в которой на каждой дорожке имелась собственная фиксированная головка считывания и записи.



**ВЕКТОРНАЯ ОБРАБОТКА** — это простая форма параллельных вычислений, допустимых на современных суперкомпьютерах. Под вектором понимается упорядоченный список данных, с каждым из элементов которого можно выполнять операции в паре с аналогичным элементом другого списка, имеющего ту же длину. Аппаратура ЭВМ обеспечивает одновременное выполнение операций над длинными строками таких пар данных. Компьютеры ILLIAC IV, Cray-1 и CYBER 205 имеют различную архитектуру, и поэтому у них отличаются оптимальные длины векторов, что и показано на этих кривых. Мегафлоп — единица производительности компьютера, равная 1 млн. арифметических операций с плавающей точкой в секунду. Максимальная производительность каждого компьютера зависит от конкретной векторной операции, используемой в вычислениях. Для компьютера CYBER 205 ее величина равна 400 мегафлопам.

Все диски были синхронизированы, что давало возможность хорошему программисту обеспечить скорости обмена с диском, превышающие 7 млн. слов (длиной в 64 бит) в секунду. В результате, несмотря на свою примитивную архитектуру и малый объем центральной памяти, ILLIAC IV был самым быстродействующим компьютером среди машин, предназначенных для решения наиболее сложных задач. Его повседневный режим работы включал моделирование аэродинамиче-

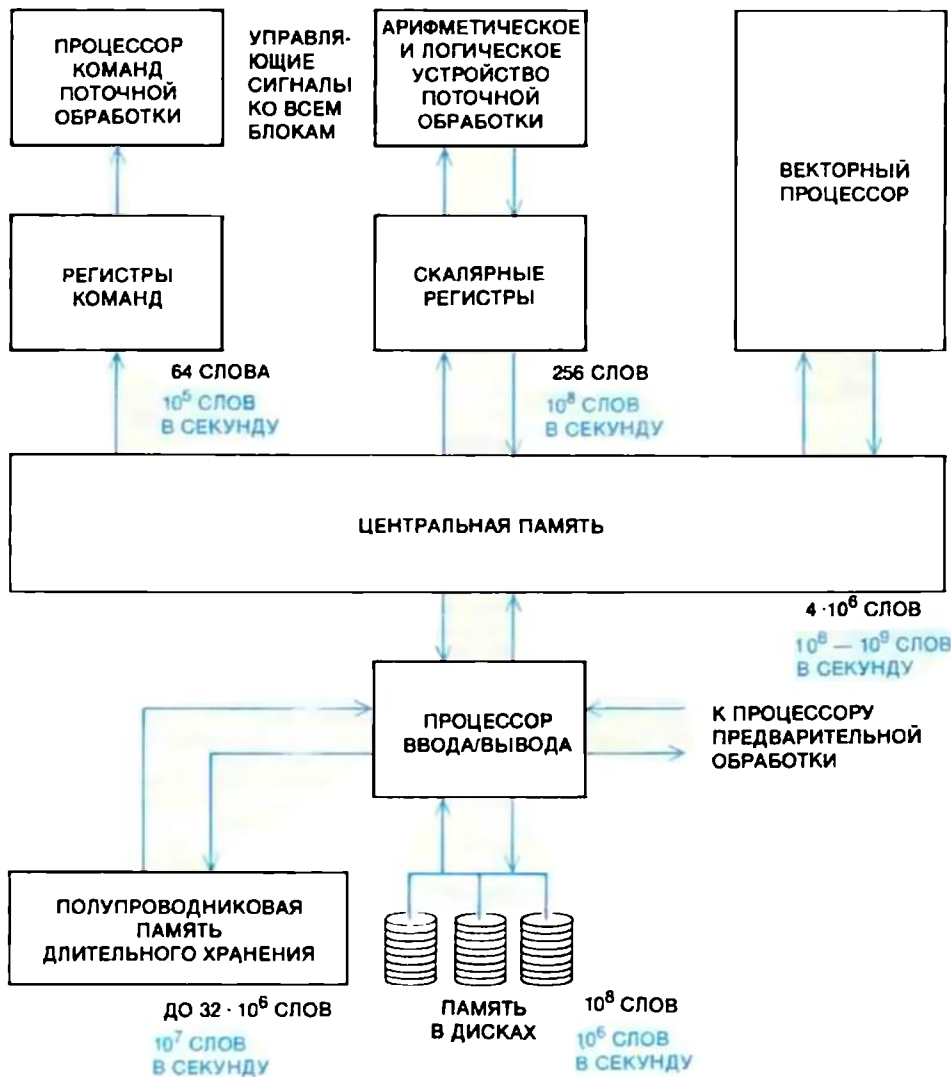
ских процессов с объемом данных 8 млн. слов по 64 бит или 16 млн. слов по 32 бит. Фирмы Control Data и Cray Research, а также некоторые другие в последнее время предложили память нового уровня, занимающую промежуточное положение между центральной памятью и памятью на дисках. Эта память могла бы быть реализована с использованием полупроводниковых устройств на оксидах металлов (MOS-технологии) и содержать свыше 32 млн. слов при стоимости около 10 цент. за

слово. Первые модели Cray-1 или CYBER 205, укомплектованные такой памятью, могли бы лишиться ILLIAC IV права считаться самым быстродействующим компьютером в мире.

Здесь уже упоминалось о горизонтальной структуре памяти ILLIAC IV, центральная память которого разделена на 64 связанных модуля, работающих параллельно, причем каждый модуль работает с одним процессором. Некоторые разрабатываемые в настоящее время суперкомпьютеры мультипроцессорного типа используют усовершенствованный вариант этой схемы. Ряд независимых параллельных модулей памяти связывается с таким же числом независимых процессоров при помощи высокоскоростного программного управляемого переключателя так, чтобы все модули памяти были одинаково доступны для всех процессоров.

Для ПРОЦЕССОРОВ поточного действия был разработан другой тип горизонтальной структуры центральной памяти. Память разделяется на ряд фазовых участков, называемых так потому, что каждый из них имеет свой временной цикл доступа, не совпадающий по фазе с циклами доступа других участков. Обслуживанием такой структуры служит тот факт, что центральная память со случайным доступом относительно медленная и требуется вполне определенное минимальное число машинных тактов между моментами обращения к памяти. Для того чтобы обеспечить подачу векторных операндов на поточную обработку со скоростью одно слово в машинный такт, векторы запоминаются как последовательные операнды в различных фазовых участках. Фазовый сдвиг, который обеспечивает доступ к фазовым участкам с искомыми данными, равен одному машинному такту процессора. Компьютер CYBER 205 имеет 16 фазовых участков, Cray-1 — соответственно 8 или 16 участков в зависимости от размера памяти. В обеих машинах время цикла фазового участка равно четырем циклам процессора. Таким образом, центральная память Cray-1 имеет ширину полосы, равную одному слову за цикл в 12,5 нс, т.е. 80 млн. слов в секунду. В компьютере CYBER 205 метод разбиения на фазовые участки сочетается с вертикальной структуризацией памяти, которая при этом разбивается на ряд синхронизированных блоков, называемых стеками. Центральная память при объеме в 1 млн. слов имеет 8 стеков, а при объеме 2 или 4 млн. слов — 16. Максимальная ширина полосы памяти компьютера CYBER 205, имеющий 16 стеков, равна 16 словам в машинный такт (20 нс, т.е. 800 млн. слов в секунду).

Процессоры компьютера CYBER 205 обладают средствами для организации двух или четырех процессов поточной обработки арифметических действий с плавающей точкой. Для краткости эти средства будем называть конвейерами. Четырехконвейерная модель должна иметь по крайней мере 2 млн. слов центральной памяти, чтобы ширина полосы была достаточной для поддержания конвейеров в загруженном состоянии. Во всех конвейерах предусмотрены операции сложения, вычитания, умножения, деления и извлечения квадратного корня. При выполнении данной векторной операции, скажем сложения, все конвейеры работают одновременно и каждый из них имеет производи-

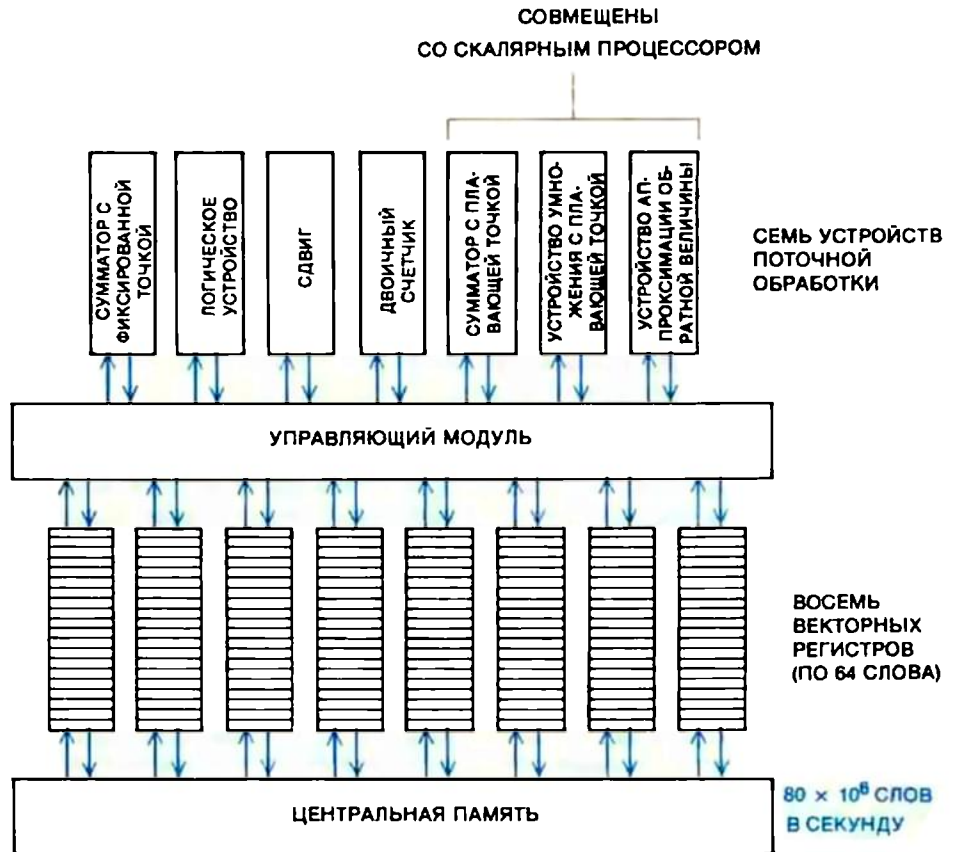


ОБЩЕННАЯ БЛОК-СХЕМА современного векторного суперкомпьютера может считаться упрощенной моделью компьютеров Cray-1 и CYBER 205. Память в них организована иерархическим способом. Самой малой емкостью обладают две памяти на регистрах. За ней в порядке возрастания емкости следуют центральная память, полупроводниковая память длительного хранения (кэш-память) и память на магнитных дисках. Приблизительные значения емкости указаны черными цифрами, а ширина полосы, выражающая быстродействие, — цветными цифрами. Полупроводниковая память длительного хранения только недавно начала появляться в суперкомпьютерах. Причина ее появления заключается в том, что технология производства вращающихся дисков не выдержала темпов роста быстродействия процессоров. (Самая большая такая память с емкостью 8 млн. слов у компьютера Cray-1, установленного недавно в Exxon Research Laboratories, Хьюстон, шт. Техас.) Все функциональные устройства, изображенные на схеме, предназначены для поточной обработки, при которой задача разбивается на составные части, каждая из которых выполняется отдельно с максимальной скоростью, а затем они снова собираются в последовательный поток. При такой обработке достигается скорость, равная одной операции с плавающей точкой за машинный такт, что составляет 20 нс в компьютере CYBER 205 и 12,5 нс в Cray-1. Все функциональные устройства могут работать параллельно, но не с максимальной скоростью, поскольку они используют одни и те же ресурсы, такие, как каналы передачи данных или циклы доступа к памяти. Кроме того, плавное прохождение команд через процессор команд прерывается условными переходами в программах. Перед тем как выдать команду, процессор должен ждать до тех пор, пока все ресурсы, необходимые для выполнения команды, не будут доступны в тот момент, когда они понадобятся. В Cray-1 память на регистрах имеет свою иерархическую структуру и, кроме того, векторный процессор содержит дополнительную память на регистрах. Векторные процессоры компьютеров Cray-1 и CYBER 205 имеют также и другие значительные отличия.

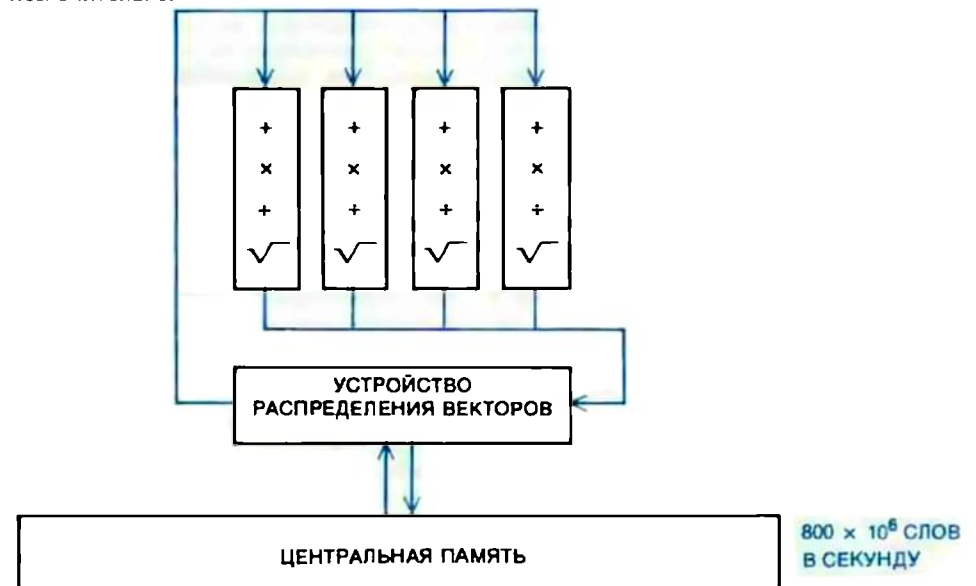
тельность, равную одному результату за 20 нс. Время загрузки для процесса поточной обработки векторов достаточно велико: примерно 50 циклов или 1 мкс (т.е. интервал от обращения к команде до появления первого результата). Таким образом, максимальная эффективность выполнения векторных операций возможна только при обработке длинных векторов, когда начальное время установления режима поглощается большим числом операций с плавающей точкой. Для достижения скорости, составляющей 50 % максимального значения эффективности в мегафлопах, длина вектора должна быть по меньшей мере равна 200 бит. В компьютере CYBER 205 реализованы удобные средства для программирования вычислений с повышенной точностью. Каждый конвейер выполняет операции со словами в 32 бит вдвое быстрее, чем со словами в 64 бит.

Процессор компьютера Cray-1 включает 13 функциональных устройств поточного типа специального назначения, которые могут работать параллельно. Имеется также большой набор регистров, подчиняющийся некой иерархической структуре. Три из этих функциональных устройств предназначены для выполнения арифметических действий с плавающей точкой: одно — для сложения и вычитания, одно — для умножения и одно — для вычисления обратных величин. Важное отличие между Cray-1 и CYBER 205 состоит в том способе, которым векторы продвигаются в функциональных устройствах поточной обработки. В противоположность операциям типа «память — память» конвейеров компьютера CYBER 205 конвейеры плавающей точки компьютера Cray-1 взаимодействуют с набором векторных регистров, состоящим из 8 компонент, каждая из которых содержит 64 слова по 64 бит. Одним из результатов передачи векторов по схеме «регистр — регистр» является получение пиковых значений кривой эффективности работы как функции длины вектора на значениях длин, кратных 64, что отчасти соответствует экстремумам кривой эффективности ILLIAC IV. Однако эффективность Cray-1 с увеличением длины вектора в общем возрастает, поскольку при этом потери времени на загрузку процесса поточной обработки постоянно уменьшаются.

ДРУГАЯ отличительная особенность этой схемы заключается в том, что на заполнение и приведение в рабочее состояние конвейеров Cray-1 требуется около 50 нс (четыре машинных такта), что составляет только двадцатую часть интервала времени для запуска конвейеров CYBER 205. Таким образом, эффективность Cray-1 для коротких векторов выше эффективности CYBER 205. Основным препятствием для повышения скорости векторных операций в Cray-1 служит ограниченная скорость обмена между центральным процессором и основной памятью. Удачной, компенсирующей это «узкое место» особенностью Cray-1 является способность выполнять цепочки из нескольких операций одновременно над элементами векторов, пока они находятся в наборе регистров. Оптимальное использование компьютера Cray-1 зависит от программ, обеспечивающих максимальную длину таких цепочек. В компьютере CYBER 205 реализована ограниченная форма использования цепочек для трехместных операций — над двумя векторными операндами и одним скалярным.



ВЕКТОРНЫЙ ПРОЦЕССОР КОМПЬЮТЕРА CRAУ-1 включает семь устройств поточной обработки для выполнения некоторых функций. Три из них совмещены со скалярным процессором, который управляет не векторными операциями. (Регистр двоичного счетчика считает двоичные единицы, что необходимо в отдельных задачах.) Некоторые из устройств могут одновременно выполнять различные векторные операции. Векторные данные поступают из восьми регистров, проходят через функциональные устройства и возвращаются назад. Управляющий модуль переключает направление прохождения операндов от регистров к функциональным устройствам и назад. В то время как некоторые из регистров служат источниками операндов или местом приема результатов для векторных операций, другие могут обмениваться информацией с центральной памятью в прямом или обратном направлении. Вследствие того что обмен векторными данными происходит между регистрами, поточные линии довольно коротки и время их загрузки незначительно.



ВЕКТОРНЫЙ ПРОЦЕССОР КОМПЬЮТЕРА CYBER 205 имеет до четырех идентичных устройств общего назначения для организации поточного выполнения арифметических операций в случае данных с плавающей точкой. Каждое из них может складывать, умножать, делить и извлекать квадратные корни, но в любой заданный момент времени все они выполняют одну и ту же операцию с различными парами элементов в одном векторном действии. Устройство распределения векторов управляет передачей данных между поточными линиями с плавающей точкой и центральной памятью. Поскольку центральная память служит одновременно источником векторных операндов и местом записи результатов, общая длина векторной поточной линии и время загрузки процесса поточной обработки велики. Но так как скорость обмена с центральной памятью у компьютера CYBER 205 намного больше, чем у Cray-1 (800 млн. слов в 1 с), то из этих двух первый работает быстрее, когда длина вектора превышает определенную величину.

Добавим, что Cray-1, поскольку он имеет короткое время цикла, — самый быстродействующий компьютер для задач с преимущественным использованием операций над скалярными величинами и над короткими векторами. CYBER 205 в силу того, что он имеет большую ширину полосы связи между памятью и центральным процессором, — самый быстрый компьютер для решения задач, которые могут быть запрограммированы с использованием длинных векторов. ILLIAC IV вследствие большой ширины полосы для связи со вторичной памятью оказался более быстродействующим, чем любая из выпущенных моделей Cray и CYBER, для задач, использующих самые крупные базы данных.

Несмотря на значимость векторных операций в моделировании сплошных сред, можно заметить, что существует все же много важных больших задач, к которым векторная форма организации вычислений не может быть эффективно применена. В задачах, где в больших объемах используется поиск и сортировка, а также там, где часты условные переходы, возможность эффективного применения векторов ограничена. Все же некоторые такие задачи имеют и другие формы одновременного выполнения операций. Векторные компьютеры могут выполнять как скалярные, так и векторные команды, но только в одном последовательном потоке. Они называются компьютерами типа SIMD. Обычные последовательные компьютеры, в которых отсутствуют средства для одновременных вычислений, в настоящее время иногда называют машинами типа SISD.

Долгие годы предметом обсуждения были машины, которые могли бы оперировать потоком множественных команд и потоком множественных данных, — машины типа MIMD. Такую машину можно представить как совокупность процессоров общего назначения; каждый процессор способен обрабатывать поток команд независимо от остальных и в то же время общаться с остальными на некотором уровне так, что все вместе они могли решать одну задачу. Малые экспериментальные машины типа MIMD созданы в нескольких университетах. Первые промышленные образцы компьютеров типа MIMD высокого класса ожидаются к концу 1982 г.

Один из очевидных способов построения машины типа MIMD заключается в соединении ряда однопроцессорных систем типа SIMD и большой быстрой памяти посредством высокоскоростной сети переключения данных. Существует другая возможность построения машины MIMD, состоящая в использовании одного процессора с архитектурой поточного типа, реализованной при помощи аппаратных средств для мультипроцессорной обработки потоков команд, т.е. для создания режима разделения времени. Интересным примером такой машины является процессор на гетерогенных элементах HEP — мультипроцессорная система, разработанная фирмой Deneclog, Inc. (Денвер, шт. Колорадо) для Army Ballistic Research Laboratories. Основной процессор этой системы (модуль PEM) способен обслуживать множественные процессоры при помощи аппаратно реализованного режима разделения времени для управления командами и их выполнения. Каждый процессор периодически получает возможность выполнения команды, а логика

работы имеет поточную организацию, что обеспечивает в любой момент времени нахождение нескольких процессоров в различных фазах. Новая команда может начать выполняться с любого машинного такта, при этом большинство из них заканчивается за 8 машинных тактов. Хотя каждый процесс может быть обслужен по крайней мере один раз за 8 циклов, несколько одновременно выполняемых процессов могут представлять различные подзадачи одной программы, так что максимальная скорость выполнения в действительности равна одной команде за цикл.

**СИНХРОНИЗАЦИЯ** совместных процессов обеспечивается при помощи аппаратно реализованных индикаторов ячеек памяти, указывающих, находится ли ячейка в состоянии ожидания приема данных некоторого процесса, или она содержит данные для передачи. В процессоре PEM одновременно могут обрабатываться 128 процессов; чтобы полностью загрузить аппаратуру и иметь при этом максимальную скорость выполнения команд, необходимо по крайней мере 8 процессоров. Используемые в схеме HEP чипы имеют только средний уровень интеграции, и поэтому машинный такт намного меньше 10 нс, а максимальное быстродействие составляет 10 млн. команд в секунду. В машине предусмотрены средства для выполнения векторных команд, поэтому средняя скорость в мегафлопах немного ниже 10.

Система HEP максимальных режимов могла бы объединить 16 процессоров PEM и память с объемом до 128 млн. слов длиной 64 бит посредством высокоуровневой сети переключателя данных. Процессы, выполняемые по одной программе, могут быть динамически распределены по нескольким модулям PEM, чтобы система HEP была устойчива к неисправностям. Когда один или более модулей PEM отключается на профилактику или ремонт, оставшаяся часть системы может продолжать поддерживать нормальный режим работы с пропорционально уменьшенной скоростью. Система с 16 модулями PEM могла бы выполнять до 160 млн. команд в секунду, что вдвое больше максимальной производительности Cray-1. Хотя стоимость системы HEP намного превосходила бы стоимость Cray-1, она все же была бы вне конкуренции с ней, так как исключалась бы необходимость трудоемкого приведения больших задач к векторному виду, который требуется для машины Cray. По-видимому, нет принципиальных препятствий для реализации архитектуры HEP на чипах с повышенной плотностью элементов и большим быстродействием. Это позволило бы, возможно, в 8 раз увеличить скорость и достичь более высокой экономической эффективности.

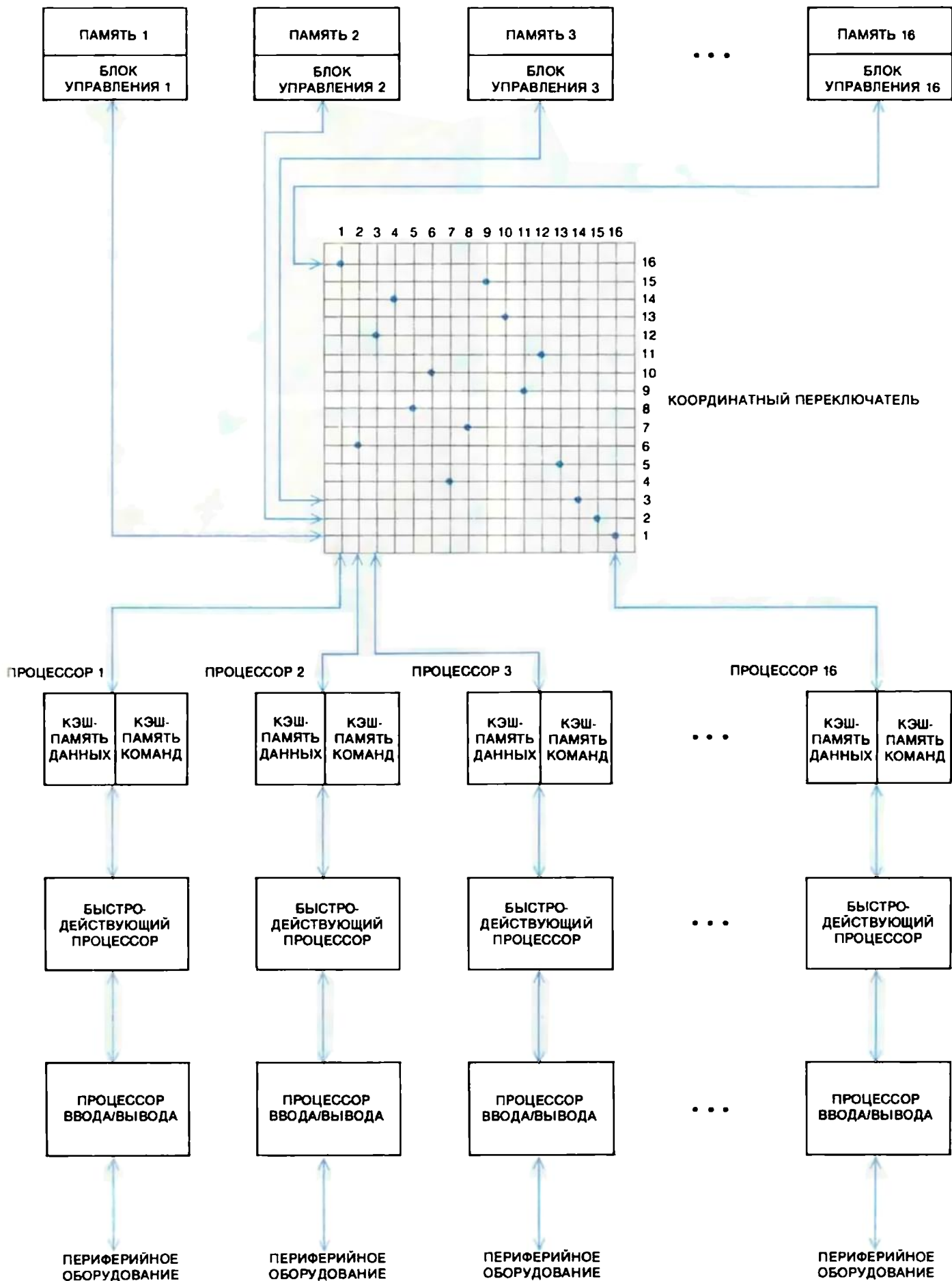
В новых суперкомпьютерах, находящихся сейчас в стадии создания или разработки, наблюдается явная тенденция к увеличению объема мультипроцессорования. Сфера применения поточной обработки ограничивается в основном тем, насколько процесс вычислений поддается разбиению для одновременного выполнения на потоке. Увеличение же объема вычислений, вызванное параллельной работой процессоров, ограничивается лишь стоимостью. Большинство разработчиков считают, что мультипроцессор должен состоять из небольшого числа про-

стых, но достаточно мощных процессоров. Хотя стоимость мультипроцессорной системы линейно растет с увеличением числа простых процессоров, производительность ее увеличивается медленнее из-за возникающих здесь связей и неизбежно малой эффективности использования простых процессоров.

Успех развития суперкомпьютеров будет зависеть в большой мере от уменьшения времени на их создание и производство в условиях бурного прогресса технологии. В последнее время широкое признание получил метод разработки более совершенных моделей компьютеров при помощи уже существующих компьютеров. В качестве первого шага на пути реализации такого подхода для создания современного мультипроцессорного суперкомпьютера для военно-морских сил США группа разработчиков, участвующих в проекте S-1 в Livermore National Laboratory, сконструировала систему SCLAD. Она представляет собой программу из 60000 строк на языке высокого уровня Паскаль. Система предоставляет инженеру возможность выразить конструктивные принципы его разработки (на любом уровне двоичной логики) при помощи некоего абстрактного языка, подобного тому, который он обычно использует при обдумывании проекта и при его обсуждении с коллегами. Трудоемкую работу по изготовлению проекта в окончательном виде и его детальную проверку осуществляет машина.

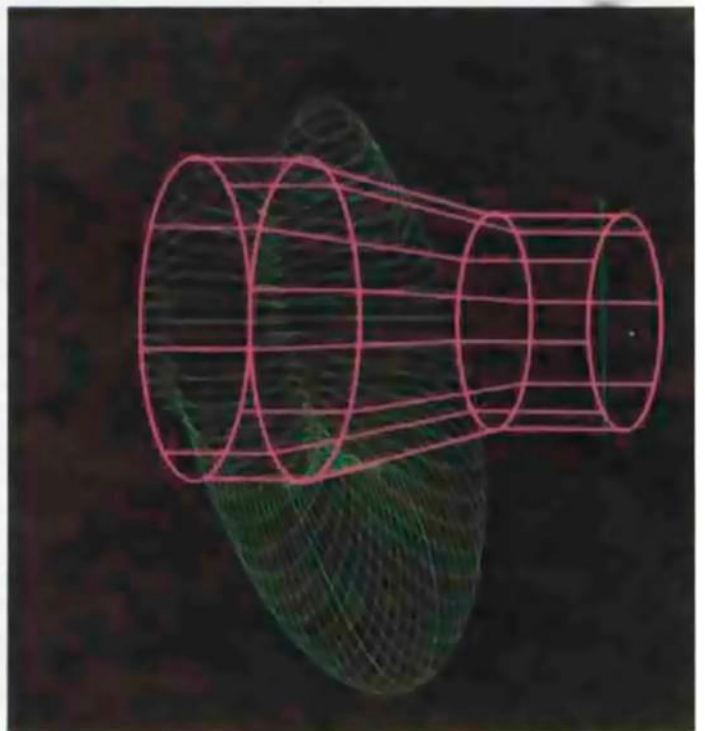
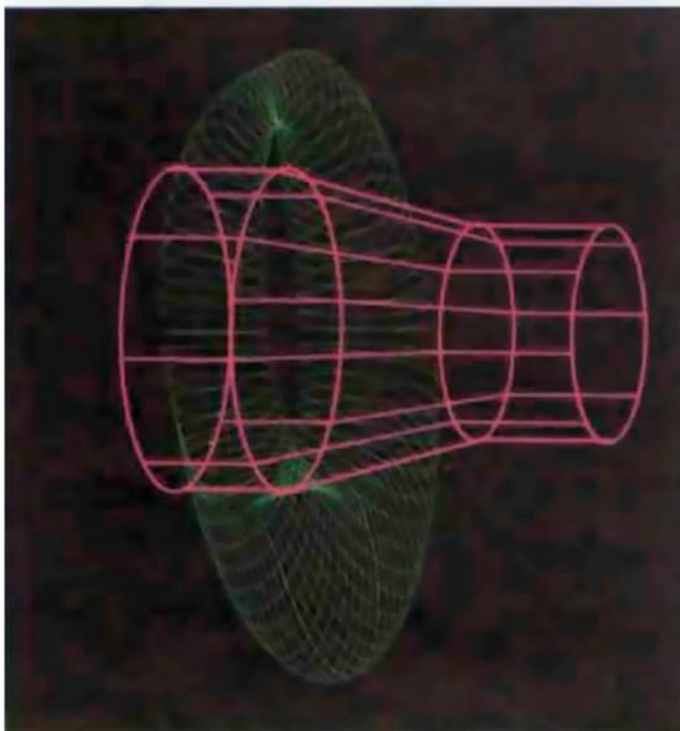
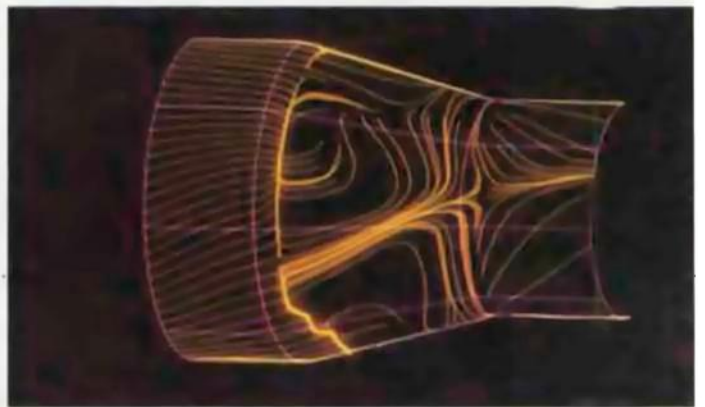
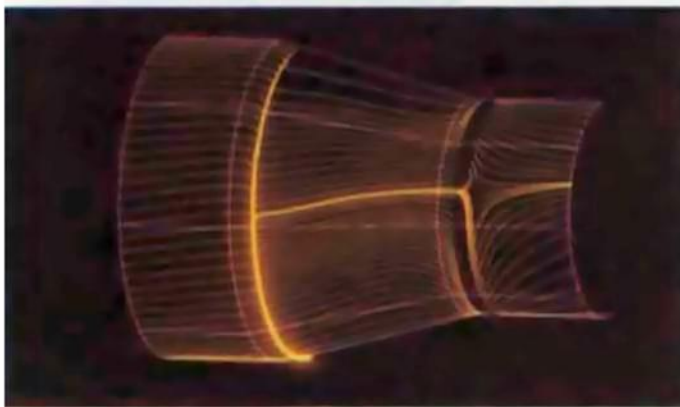
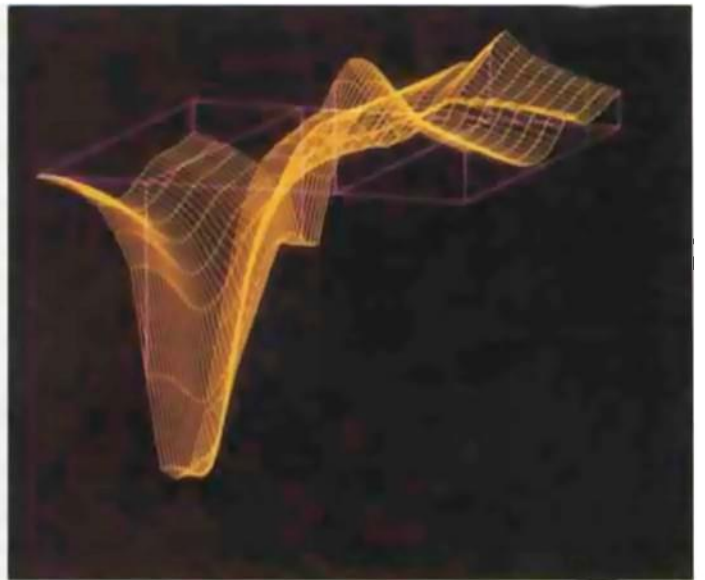
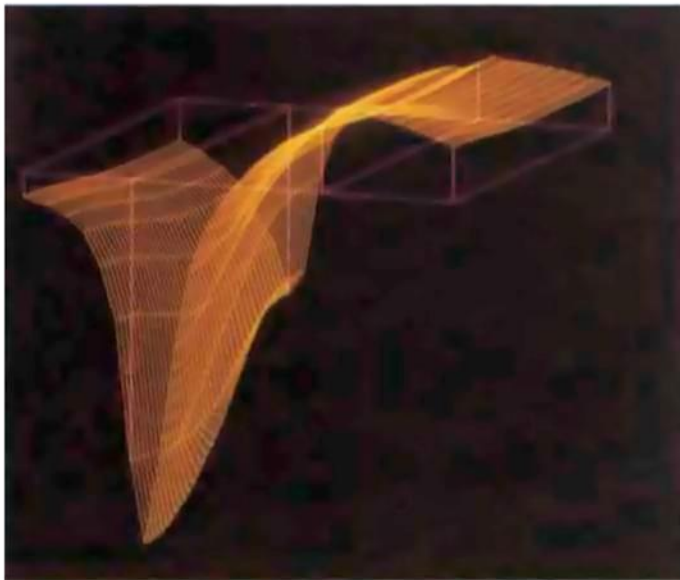
**ПРИ ПОМОЩИ** системы SCLAD небольшая группа инженеров из той же лаборатории менее чем за год создала подробный проект мощного компьютера Mark IIА для научных исследований (типа SIMD). Задуманный как однопроцессорная система с расчетом на дальнейший переход к мультипроцессорной, Mark IIА имеет довольно сложную и гибкую архитектуру. Целью этой группы было создание машины, которая бы выгодно отличалась от Cray-1. Однако трудно предсказать, каковы будут относительные производительности этих двух машин, так как иерархическая структура памяти у них принципиально разная с точки зрения емкости и ширины полосы на каждом уровне. Стоимость Mark IIА будет существенно ниже, чем стоимость Cray-1, поскольку Mark IIА реализован на более дешевых современных элементах, обладающих большей плотностью. Основная память, например, будет состоять из чипов, изготовленных по MOS-технологии с плотностью 65 536 бит на чип, тогда как основная память у Cray-1 имеет плотность 4096 бит на чип. Мультипроцессор S-1 будет содержать до 16 простых процессоров Mark IIА и общую память объемом в сотни миллионов слов.

Увеличение быстродействия мультипроцессоров типа MIMD, таких, как S-1 и HEP, возможно вследствие увеличения числа процессоров, безусловно, будет зависеть от характера решаемых задач. Чтобы эффективно использовать такие машины для задач моделирования сплошных сред с большим числом итераций, необходимо разработать новые алгоритмы. С другой стороны, некоторые приложения, такие, как обработка изображений в реальном масштабе времени, в силу своей специфики поддаются мультипроцессорованию, поскольку возможность применения для них поточного способа очевидна. В то время как процессор №1 выполняет



МУЛЬТИПРОЦЕССОР S-1, разрабатываемый сейчас в Lawrence Livermore National Laboratory для военно-морских сил США, будет координировать работу до 16 однопроцессорных систем, каждая из которых проектируется как компьютер общего назначения, по мощности равный Cray-1. Быстродействующий координаторный переключатель обеспечит каждому из процессоров доступ к любому из 16 больших блоков памяти. Каждый блок памяти

связан с одним горизонтальным рядом контактов переключателя, а каждый процессор — с одним вертикальным. В каждый момент времени любой горизонтальный ряд может быть подключен к любому из 16 вертикальных рядов. Переключение этих контактов будет управляться программой. Работа над первой однопроцессорной системой Mark IIA близится сейчас к завершению.



РАЗЛИЧНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ можно получить при решении компьютером сложных задач. В данном случае задача аналогична представленной на первом рисунке (см. с. 17). В ней требовалось получить модель воздушного потока, окружающего кормовую часть ракеты, движущейся со скоростью, близкой к звуковой. На ILLIAC IV была рассчитана модель потока для нескольких углов атаки, т.е. для различных углов наклона оси корпуса ракеты к направлению полета. Получение решения для каждого угла атаки заняло около 18 ч машинного времени. Приведенные рисунки, полученные по программе А. Борджи, иллюстрируют три способа представления лишь небольшой части результатов для двух углов атаки — 4 град (слева) и 12 град (спра-

ва). Вуалеобразные графы в верхнем ряду показывают изменения давления воздуха над верхней частью хвоста корпуса ракеты. Полосообразные конфигурации на фотографиях среднего ряда изображают срез поверхности: поток воздуха, непосредственно примыкающий к поверхности кормовой части. При угле атаки 12 град поток меняет направление. Изображения, помещенные в нижнем ряду, представляют собой очертания седловидной поверхности, когда воздушный поток достигает скорости звука. Конфигурация при угле атаки 12 град аналогична изображенной на рисунке в начале статьи в виде непрерывной поверхности (см. с. 17).

## Произволен ли генетический код?

ДУГЛАС Р.ХОФШТАДТЕР

первую стадию преобразования информации системы данных п, процессор №2 выполняет вторую стадию вычислений над системой п—1, процессор №3 обрабатывает систему п—2 на третьей стадии и т.д.

Процесс общения компьютера с внешней средой, осуществляемый посредством ввода/вывода, по сравнению с обращениями внутри машины протекает очень медленно. Это является следствием того, что внешние устройства содержат механические компоненты, быстрдействие которых зависит от реакции обслуживающего их человека. Для того чтобы освободить суперкомпьютер от управления большим числом каналов ввода/вывода и сохранить полезное время для вычислительных операций, большинство суперкомпьютеров оборудовано процессорами ввода/вывода с одной или более вспомогательными машинами. Самые последние модели Сгау-1 снабжены рядом процессоров ввода/вывода, которые представляют собой быстрдействующие компьютеры с короткой длиной слова и ограниченным набором команд. Они предназначены для управления высокоскоростными каналами передачи между центральной памятью и устройствами вторичной памяти, периферийным оборудованием, а также между компьютерами предварительной обработки. Работу компьютера предварительной обработки по отношению к суперкомпьютеру можно сравнить с деятельностью секретарей, обслуживающих начальство. Машины предварительной обработки, обладая достаточной мощностью, могут самостоятельно использоваться для научных исследований. Они способны преобразовывать большие объемы информации к виду, удобному для восприятия человеком. Например, непреобразованные результаты моделирования аэродинамического потока могут состоять из миллиона числовых величин. Инженер будет подавлен таким обилием информации, если ее не представить графически или даже в виде кинофильма.

НЕСКОЛЬКО крупных научно-исследовательских центров разработало сложную сеть передачи данных, объединяющую ряд суперкомпьютеров, процессоров предварительной обработки, компьютеров общего назначения других типов, банков данных большой емкости и станций графических дисплеев. Это позволяет пользователю получать быстрый доступ к большей части требуемых для его задачи данных. Хотя число суперкомпьютеров еще невелико, они становятся широкодоступными благодаря развитию внутригосударственных и международных высокоскоростных сетей передачи данных, которые связывают научные центры.

Пользователи суперкомпьютеров постоянно испытывают потребность в увеличении их мощности, необходимой для решения задач, находящихся на рубежах наук. У создателей вычислительных машин достаточно различных идей для удовлетворения запросов пользователей. Возможно, в ближайшие годы мы станем свидетелями ускоренного прогресса в области развития суперкомпьютеров, стимулируемого быстрыми технологическими изменениями производства элементной базы, новыми методами проектирования вычислительных машин и большим числом пользователей супермашин, работающих над решением задач расчета сплошных сред.

ВСЕ НАЧАЛОСЬ с одного моего дошного студента, которого звали Вейх Саркисян. Я излагал группе студентов, изучающих программирование, одну из своих излюбленных идей о сходстве между сложным механизмом, действующим в живой клетке, и аппаратом математической системы, устроенным так, что формула говорит сама за себя. На мой взгляд, такая аналогия глубока и плодотворна: она позволила мне лучше разобраться в обеих областях. Хотя Вейх и отдалей должное, он усомнился в одном из важных положений моих рассуждений и предложил обсудить этот вопрос. Его вызов заставил меня тщательно все обдумать, и я открыл для себя удивительные подробности биологии клетки, о которых иначе так бы никогда и не узнал. Я чувствую себя вознагражденным при мысли о том, что даже те, кто не знаком с молекулярной биологией, смогут оценить их значение и красоту.

Оба крупнейших открытия XX в., которыми я оперирую, связаны с проблемой кодирования, кажущегося на первый взгляд произвольным отображением одного множества в другом. В метаматематике кодом является нумерация Геделя, в биологии это генетический код. В нумерации Геделя кодовые числа присвоены различным математическим символам (например, круглым скобкам) так же, как автомобилям присваивают номера, а городам — телефонные коды. Такое отображение связывает понятия из двух совершенно различных областей — топографической и абстрактной.

Генетический код точно так же является отображением двух не связанных между собой множеств. Правда, в данном случае оба множества состоят из элементов одной и той же природы — химических соединений. Для тех, кто незнаком с химической терминологией, разница между двумя этими множествами может показаться недостаточной, чтобы удивляться их связи. В процессе эволюции сложилось так, что химические единицы одного вида являются кодовым выражением химических единиц другого вида, причем одной единице вида II соответствует триплет единиц вида I. На самом деле одной и той же единице вида II иногда соответствует несколько различных триплетов. Сейчас, однако, для нас это не важно. Главное, что химические единицы двух совершенно неродственных видов отображают друг друга. Вопрос Вейха стоял так: «Насколько произвольно это отображение?»

Вид I — это нуклеотиды, вид II — аминокислоты. Если эти слова вам неизвестны, не пугайтесь. Вам нет нужды разбираться в химии, чтобы вообразить это соответствие, эту согласованность между представителями двух различных химических видов. Необходимо знать только, что каждому триплету нуклеотидов (чем бы они ни были) соответствует аминокислота (что бы это ни было). Вот что такое генетический код.

О назначении кода трудно говорить, не рассказав немного о компонентах клетки.

Характер клетки, ее «индивидуальность» записаны в ее генах. Гены, однако, в сущности статичны, как слова в книге. Чтобы они проявили себя, их необходимо «перевести» на язык каких-то подвижных агентов. Такими агентами являются белки: через их активность реализуются возможности генов. Говорят об экспрессии (т.е. выражении) генов, которая и определяет характерные особенности клетки. Гены — это цепочки из нуклеотидов, а белки — цепочки из аминокислот. Индивидуальность клетки, таким образом, записана в пассивных химических единицах вида I. С помощью генетического кода эту запись можно перевести в набор подвижных агентов, построенных из химических единиц вида II. Стало быть, благодаря генетическому коду определяемая генами индивидуальность клетки может себя проявить.

СУЩЕСТВУЕТ 20 различных аминокислот, и можно подумать, что должно быть 20 нуклеотидных триплетов. Однако дело обстоит не так просто. Генетический код составлен из четырех различных нуклеотидов, их обозначают А, С, G и U (аденин, цитозин, гуанин и урацил). Любой возможный триплет (начиная с AAA, AAC, AAG и кончая UUU) соответствует какой-либо аминокислоте. (Впрочем, не совсем так. Три триплета не кодируют никакой аминокислоты, но пока что это не-

### 20 аминокислот

Аланин	Ala
Аргинин	Arg
Аспарагин	Asn
Аспарагиновая кислота	Asp
Цистеин	Cys
Глутамин	Gln
Глутаминовая кислота	Glu
Глицин	Gly
Гистидин	His
Изолейцин	Ile
Лейцин	Leu
Лизин	Lys
Метионин	Met
Фенилаланин	Phe
Пролин	Pro
Серин	Ser
Треонин	Thr
Триптофан	Trp
Тирозин	Tyr
Валин	Val

### 4 нуклеотида

Аденин	A
Гуанин	G
Урацил	U
Цитозин	C

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ КОД

ПЕРВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ	ВТОРОЕ ПОЛОЖЕНИЕ				ТРЕТЬЕ ПОЛОЖЕНИЕ
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	T	T	A
	Leu	Ser	T	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

Пример: C (левый столбец), A (верхняя строка), G (правый столбец), триплет CAG кодирует глутамин (Gln).

Буквой T обозначены «бессмысленные» кодоны, служащие сигналами к терминации, т.е. к прекращению синтеза белка.

существенная для нас деталь. Сколько же таких триплетов? Шестьдесят четыре, конечно:  $4 \times 4 \times 4$ . Следовательно, 61 (64-3) различных триплет соответствует 20 аминокислотам. При этом некоторые аминокислоты кодируются более чем одним кодоном (кодон — это триплет нуклеотидов). Некоторым аминокислотам соответствует шесть различных кодонов, некоторым — четыре, некоторым — три и некоторым — два; только двум аминокислотам соответствует по одному кодону. Полный генетический код приведен в таблице.

Вернемся к Вейху. С одной стороны, он заметил, что нумерация Геделя совершенно произвольна. Гедель мог обозначить данный математический символ любым числом (номером); каким именно — для его рассуждений было неважно. Но с другой стороны, Вейх понимал, что генетический код гораздо сложнее. Он чувствовал, что есть какие-то веские причины, из-за которых каждой аминокислоте соответствует именно такой кодон (или кодоны), а не другой, что должна существовать глубокая химически обусловленная необходимость такого соответствия. Кто-то возразил Вейху: «Код Геделя — это творение простого смертного, а генетический код — творение бога. Поэтому генетический код должен быть совершенным, постоянным и неизменным». Я сразу сказал, что, насколько я могу су-

дить, дело вовсе не в этом. Генетический код так же произволен, как выбор телефонной станцией номеров для разных районов, так же произволен, как система нумерации Геделя. Я нарисовал на доске несколько молекул, чтобы проиллюстрировать свои доводы. Но пока я стоял у доски, мне пришло в голову, что я не всегда полностью уверен в своих словах; некоторые факты стоило по-настоящему проверить. Желание доказать произвольную природу генетического кода увело меня в дебри молекулярной биологии; о своих находках я и хочу здесь рассказать.

Давайте вернемся к клетке. Клетка, точно миниатюрный город, так и кипит жизнью. В этом «городе» есть объекты в основном двух типов: пассивные частицы — «увальни», которые просто сидят и ждут, пока кто-нибудь что-нибудь для них сделает, и активные частицы — «работяги», всегда стремящиеся к какой-то деятельности. Активные частицы — это главным образом ферменты. Каждый фермент выполняет какую-то операцию с определенной частицей — «увальнем». (Вообще-то некоторые ферменты воздействуют не на пассивные частицы, а на другие ферменты.) Как работает фермент, нам знать не обязательно, достаточно считать, что ферменты делают свое дело — будь то расщепление частицы, соединение двух частиц вместе или какой-нибудь иной химический процесс.

КЛЕТКА так замечательно устроена, что во многих случаях можно не принимать во внимание ее химию, а рассуждать только о ее логике. Собственно, для меня это единственный способ рассуждать о том, что происходит в клетке, поскольку я не биохимик. Хотя я и пользуюсь химическими терминами, образы, которыми я мысленно оперирую, далеки от химии. Я представляю себе маленькие частицы, которые, точно по волшебству, ведут себя так, как описано в книгах по биохимии. Мое представление о химических веществах, участвующих в биологических процессах, такое же, как у большинства людей об автомобилях: они знают, как ведут себя машины в различных ситуациях, но в действительности не понимают принцип их работы. Мне нравится употреблять трудные специальные биохимические термины, хотя в действительности я понимаю лишь их логику. («Молекулярная логика живого» — так называет ее А. Ленинджер.) Возможность такого подхода, несомненно, одна из привлекательных черт молекулярной биологии.

Ферменты — это просто особые белки. Белки представляют собой причудливо изогнутые молекулы, состоящие из аминокислот. Скручивание белковой молекулы я понимаю так. Вначале я представляю себе множество аминокислот, сцепленных вместе, как вагоны поезда. (Как и в вагонах, в аминокислотах имеются приспособления, позволяющие им сцепляться друг с другом в любом порядке.) Затем я мысленно держу эту длинную цепочку аминокислот, растянув ее двумя руками. Вот я отпустил концы: р-раз — и вся цепочка свернулась в плотный маленький клубок. А теперь попробуйте вы. Вот так: возьмитесь за концы и осторожно потяните в разные стороны. Цепочка сопротивляется, но, если действовать осторожно и не дергать, можно растянуть ее, нигде не разорвав. Растянули? Хорошо. А теперь отпустите. И что же? Она свернулась точно так же. Теперь верните ее мне. Спасибо. Похоже, что белку нравится быть свернутым в маленький клубок. Эта трехмерная конфигурация, которую принимает в пространстве молекула белка, называется его третичной структурой. Третичная структура белков данного типа уникальна. Последовательность аминокислот полностью определяет третичную структуру: это значит, что данный белок всегда сворачивается одинаково, принимая одну и ту же форму. Линейная последовательность аминокислот — это первичная структура белка. Таким образом, можно сказать, что первичная структура белка определяет его третичную структуру. (Белки имеют также и вторичную структуру — промежуточный уровень спирализации, но третичная структура — это суть белка.)

Для чего же белок всегда имеет третичную структуру? Каков смысл того, что он сворачивается в клубок? Дело в том, что именно пространственная конфигурация определяет характер деятельности белка (если белок «работяга»; некоторые белки

БЕЛОК	Phe	Val	Asn	Glu	Asp	Leu	Cys	Gly	Ser																				
мРНК	C	U	U	U	G	U	U	A	A	U	G	A	A	G	A	U	U	U	A	U	G	U	G	G	U	A	G	U	A

Последовательность аминокислот в полипептидной цепи (сверху) закодирована триплетами нуклеотидов на информационной РНК (внизу).



вовсе не ферменты, а самые настоящие «увальни»; далее мы будем говорить только о ферментах). Третьичной структуре ферментов свойственны выпуклости и впадины, подобно человеческому лицу; правда, ферменты отличаются друг от друга сильнее, чем лица, поверхность их гораздо более неровна. Определенные участки фермента называют активными центрами. Именно ими фермент прикрепляется, точно пнявка, к частице-«увальню», на которую он собирается воздействовать (к субстрату).

Фермент определяет, к чему прикрепиться, благодаря соответствию формы его активного центра форме субстрата. Фермент и его субстрат часто сравнивают с замком и ключом. Ни один неправильный субстрат не подойдет. (В действительности в особых условиях это случается, но нам нет нужды вдаваться в такие тонкости.)

Ферменты очень специфичны, каждый годится только для определенного дела — ни для какого другого. Как только фермент прикрепится к субстрату, он начинает работать, как автомат, в который опустили нужные монеты. Фермент может отщеплять часть одного субстрата и прикреплять ее к другому, он может связывать два субстрата вместе, т.е. так или иначе воздействовать на частицу-субстрат. Затем фермент высвобождает продукт (или продукты), который теперь может перемещаться внутри клетки.

**В РЕЗУЛЬТАТЕ** кипучей деятельности тысяч трудолюбивых ферментов создается и существует живой организм. Именно ферменты, белки, эти клубки из цепочек аминокислот, претворяют в жизнь генеральный план, хранящийся в генах, которые представляют собой цепочки... Однако мы забегаем вперед.

Самое важное, что нужно знать о клетке, — это как работают ферменты. Они основа жизнедеятельности клетки. Впрочем, есть еще одна не менее важная сторона дела: *какие* именно ферменты имеются в клетке и откуда они там взялись. Наборы ферментов в различных клетках далеко не одинаковы, поэтому клетки и отличаются друг от друга. Более того, набор ферментов в одной и той же клетке может меняться в зависимости как от внутренних, так и от внешних причин. Откуда же берутся ферменты? В конечном счете от генов, которые являются как бы их программой, но такой ответ сейчас мало что даст. Нам нужно понять, как образуются ферменты, а не где хранятся их матрицы.

Не забывайте, что фермент — это белок, а белок — это длинная свернутая в клубок цепь аминокислот, соединенных друг с другом. Можно было бы думать, что раз ферменты так хорошо умеют разъединять и соединять, то они и строят белки. Однако синтез белка настолько тонкая, специфическая и ответственная работа, что для нее имеется особый механизм — рибосома. Рибосома состоит из белков и нуклеотидов. Впрочем, точный состав для нас не так важен. В конце концов, нас интересует только *логика* клетки.

Есть ли для каждого вида белка своя рибосома? Едва ли. В самом деле, как создать столько видов рибосом — с помощью специфических суперрибосом? Тогда как создать столько специфических видов суперрибосом? И так далее, до бесконечности. В действительности рибосо-

ма неспецифична по отношению к белкам, она ничего не знает о различных белках, которые собирает. Рибосома — это просто универсальный шиватель аминокислот. Стало быть, что-то должно подсказывать рибосоме, какие аминокислоты соединить и в какой последовательности. Но что именно? Предположим, предстоит создать цепочку лизин — лейцин — глицин — пролин — цистеин — гистидин — триптофан. (Я выбрал эту последовательность, руководствуясь только благозвучием. Она слишком коротка для настоящего белка. Белки обычно состоят из многих десятков аминокислот; они бесконечно длинные, точно товарные поезда, которые тоже кажутся бесконечными, когда проносятся с грохотом мимо.) Что приказывает рибосоме начать с лизина и закончить триптофаном?

Рискуя прибегнуть к еще одной бесконечности, скажу, что есть еще «поезд», он состоит из химических единиц вида I — нуклеотидов. Этот поезд проходит через рибосому, как настоящий поезд через железнодорожную станцию. Его «вагоны», объединенные по три, сообщают рибосоме, какая аминокислота должна быть первой, какая — второй, третьей и т.д., то есть посредством генетического кода рибосоме диктуется очередность аминокислот.

**ЭТОТ ПОЕЗД** — мРНК, информационная рибонуклеиновая кислота. Молекула мРНК представляет собой длинную цепь, состоящую из А, С, Г и U. Цепь такой РНК гораздо длиннее белковой цепочки. Она может состоять из тысяч нуклеотидов, соединенных наподобие бус. В цепи мРНК есть особые маркеры, указывающие, где начинается участок, кодирующий данный белок, и где он кончается. Вот для чего нужны те три кодона, которые не соответствуют никакой аминокислоте. Это своего рода «служебные вагоны». Оттуда рибосоме подается команда: «Обрезать белок! Не прибавлять больше ни одной аминокислоты!»

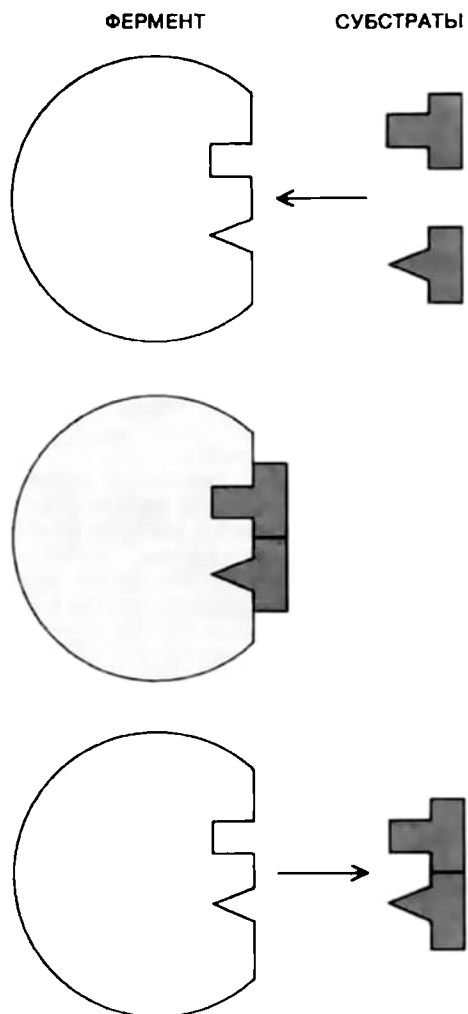
Вот мы и подошли к главному. Где хранится генетический код? Мой рассказ мог создать впечатление, будто рибосомы «знают» код, но на самом деле это не так. Хотя рибосома и осуществляет «перевод», она не знает ни одного языка. Как же это может быть?

Вообразите себя в Организации Объединенных Наций. Посол страны Нуклеотидия, господин Ну собирается произнести речь. Послали за очень опытной синхронной переводчицей Мари Босо. Однако госпожа Босо не имеет понятия, на каком языке будет произноситься речь и на какой язык ее нужно переводить. Дело плохо. В последний момент, перед самым началом речи, к переводчице прибывает аварийная команда с множеством маленьких карточек. На каждой карточке на одной стороне написано слово на языке Нуклеотидии (причем все слова состоят из трех букв), а на другой стороне — перевод этого слова на нужный язык — язык страны Аминокислот. Мари Босо спасена. Все, что она должна делать, — это внимательно слушать господина Ну и молниеносно отыскивать карточку с услышанным словом. Отыскав карточку, она ловко переворачивает ее и успевает прочесть перевод на язык аминокислот в стоявший перед ней микрофон. Следующее слово, пожалуйста!

Быть рибосомой не так уж трудно —

требуется только быстро находить нужную карточку с переводом. Но где же такие карточки в клетке? Или, вернее, что они собой представляют? В наших рассуждениях проблема генетического кода пока что несколько распылилась: вначале можно было думать, что генетический код хранится в рибосомах, теперь кажется, что он записан в каких-то «карточках». Остается лишь на последнем, коль скоро мы хотим определить, насколько произволен генетический код, следует выяснить, можно ли заменять карточки, и если да, то как?

Карточками для перевода в клетке являются тРНК — транспортные РНК. Из названия следует, что они состоят из того же материала, что и мРНК, а именно: А, С, Г и U. Так оно и есть, только некоторые нуклеотиды в тРНК иногда модифицированы ферментами, но мы можем этим пренебречь. Только что синтезированная тРНК представляет собой просто короткую РНК. Затем, в отличие от мРНК, которая остается вытянутой в длину, тРНК сворачивается подобно белкам, приобретая специфическую третичную структуру, тогда как мРНК просто местами довольно бесцельно спирализована на небольших участках. Сворачивание мРНК не нужно, а сворачивание тРНК функционально. Все тРНК сворачиваются приблизительно одинаково, напоминая по форме пухлую букву L, что-то вроде согнутой руки. Однако при более детальном рассмотрении третичные структуры различных тРНК отличаются друг от друга.



Фермент связывает молекулы двух субстратов.

Когда молекула тРНК свернута, она действует, как карточка для перевода: на одном конце у нее аминокислота, а на другом кодон (напомню, что кодон — это триплет, т.е. тройка нуклеотидов). Собственно, не кодон, а антикодон. Однако для нас это две стороны одной медали. Каждому кодону отвечает антикодон, и наоборот. Чтобы переделать кодон в антикодон, нужно просто заменить А на У, С на G (говорят, что А и У комплементарны, так же как С и G). Таким образом, для кодона СUC антикодоном будет триплет GAG, а для кодона GAG — CUC. Чтобы быть точным, следует добавить, что один конец тРНК — это, собственно, и есть антикодон. Другой конец — это участок, к которому может прикрепляться аминокислота.

**КОРОЧЕ ГОВОРЯ**, рибосома — это аппарат для перевода с одного внутриклеточного языка на другой: с языка нуклеотидов на язык аминокислот. Нуклеотидные слова — это кодоны, аминокислотные — аминокислоты. мРНК — длинная речь, записанная на языке нуклеотидов. Рибосома — проворная, но невежественная переводчица, с помощью тРНК она собирает белки, которые представляют собой дословный перевод мРНК на язык аминокислот. (Говоря «проворная», я подразумеваю следующее. В бактериальной клетке при нормальных условиях рибосома может транслировать около 20 кодонов в секунду. В клетке кролика скорость трансляции несколько меньше: немногим более 1 кодона в секунду.)

Информационная РНК («речь») кодон за кодоном проходит через рибосому. Для каждого нового кодона рибосома должна отыскать подходящую тРНК, антикодон которой соответствует данному кодону. Конечно, у рибосомы нет глаз, и она не может просто увидеть нужную «карточку», как Мари Босо. Рибосома действует методом подбора подобно принцу, искавшему Золушку по ее туфельке. Остается загадкой, как удается рибосоме находить нужную тРНК так быстро. Найдя и закрепив ее антикодон напротив кодона мРНК, рибосома откусывает от тРНК аминокислоту и присоединяет ее к растущей цепи белка; затем она освобождает «раздетую» тРНК, которая теперь может присоединить новую аминокислоту.

В этом состоит существенное отличие молекул тРНК от наших воображаемых карточек. В то время как карточки можно использовать многократно, молекула тРНК каждый раз должна заново находить «свою» аминокислоту. Но где и как это происходит? Как и чем определяется, какую именно аминокислоту тРНК должна присоединить? Эти вопросы неожиданно оказались очень важными. Мы еще к ним вернемся.

Теперь ясно, что генетический код рассеян по тысячам тРНК, плавающих внут-

ри клетки около рибосом. Можно ли как-нибудь исказить, изменить эти тРНК? Могут ли они направить процесс трансляции неверно? Конечно, мы можем представить, что аварийная команда ООН подсовывает госпоже Мари Босо не тот набор карточек и она переводит речь господина Ну на совершенно неподходящий язык. Может ли быть «неправильным» целый набор тРНК, так что они обманут рибосомы и заставят их производить бессмысленные белки? Кто может сыграть такую злую шутку?

Как раз об этом я рассказывал студентам, нарисовал типичную молекулу тРНК и сказал, что к одному ее концу — АА-концу — будет присоединяться определенная аминокислота. Но почему именно та аминокислота, какая нужна? «Все очень просто», — думал я. Как и в случае большинства химических взаимодействий в клетке, АА-конец тРНК имеет характерную «правильную» конфигурацию. Каждая тРНК будет присоединять только ту аминокислоту, которая соответствует по генетическому коду ее антикодону. Я предположил, что в тРНК определенному антикодону сопутствует определенная, строго специфическая конфигурация АА-конца. Итак, вот что я нарисовал на доске: молекула тРНК со специфическим антикодоном на одном конце и специфической конфигурацией на другом, конфигурацией, которая, по предположению, подходит лишь одному виду аминокислот.

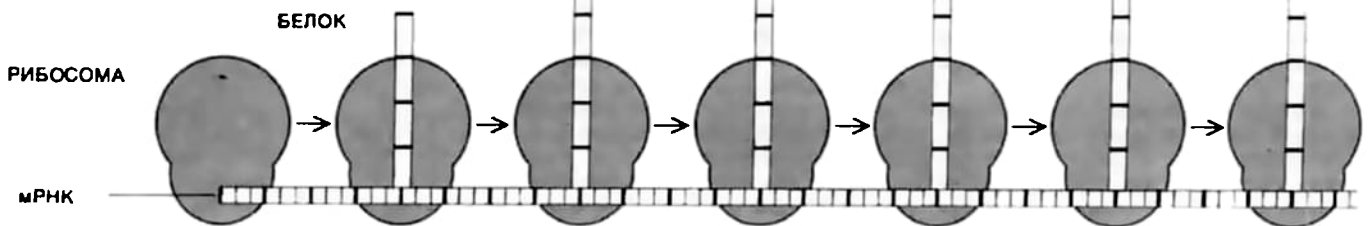
Здесь возникает законный вопрос. Почему каждая тРНК привлекает именно ту аминокислоту, которая «правильно» соответствует ее антикодону? Потому ли она «правильная», что определяется генетическим кодом? Почему бы данной тРНК не свернуться таким образом, чтобы привлечь какую-либо иную аминокислоту? Другими словами, есть ли какая-то внутренняя связь между структурой двух концов тРНК? Дает ли антикодон, например, каким-то образом знать другому концу молекулы, какую принять форму? Вот о чем думал Вейх.

**Я ОБЪЯСНИЛ** студентам, что концы тРНК ничего не знают друг о друге. Можно вырезать антикодон и заменить его другим, а АА-конец не заметит разницы. И наоборот, можно отделить АА-

конец тРНК и на его место поставить другой АА-конец, другой формы, который будет связывать «неправильную» аминокислоту, и эта тРНК станет ошибкой генетического кода. В заключение я сказал: «Поскольку концы тРНК независимы, генетический код в принципе может быть нарушен, и поэтому он является произвольным». Затем я стянул с рук мел и перешел к другой теме.

Однако оказалось, что мой рисунок, хотя и правильный по смыслу, был неверен в деталях. Все молекулы тРНК имеют на АА-конце абсолютно одинаковую конфигурацию. Например, последние три нуклеотида на АА-конце всегда ССА. Таким образом, участок, к которому присоединяется аминокислота, совершенно неспецифичен. Нет специфического химического средства между АА-концом тРНК и присоединяющейся к нему аминокислотой! Когда я это узнал (уже после лекции), я растерялся. Как же тогда тРНК всегда удается присоединить именно нужную аминокислоту? Что привлекает ее туда? Может быть, антикодон, несмотря на то что он находится на другом конце молекулы? Если так, означает ли это, что все-таки существует внутренняя связь между антикодоном и его партнером — аминокислотой? Является ли генетический код, в конце концов, предопределенным?

Побеседовав с друзьями и полистав книги, я нашел ответ, который, к моему радости, подтверждал мою точку зрения, но все оказалось гораздо сложнее, чем я ду-



Рибосома «считывает» последовательность нуклеотидных триплетов с мРНК и «прядет» белковую цепь.

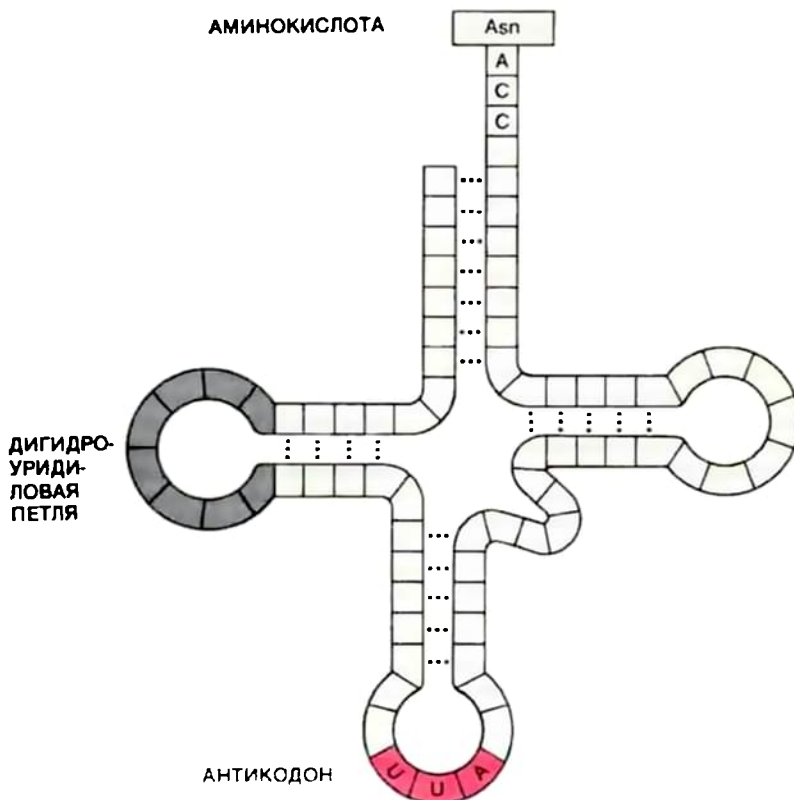
мал. Хотя АА-концу тРНК безразлична природа присоединяющейся к нему аминокислоты (в принципе, он может связать любую аминокислоту), в нормальных условиях присоединяется лишь определенная аминокислота. Это получается благодаря третичной структуре не антикодона, а другого участка тРНК — ее дигидроуридиловой петли. Такая петля имеется у всех молекул тРНК, и ее конфигурация своя для каждого вида тРНК. Это своего рода трехмерная надпись, по которой можно распознать нужную тРНК.

Но что же осуществляет узнавание? Ну конечно, ферменты — так называемые аминоацил — тРНК-синтетазы. В аминоацил — тРНК-синтетазе два активных центра. Один из них узнает тРНК, другой присоединяет аминокислоту. Второй активный центр в отличие от АА-конца тРНК не безразличен к аминокислоте. Он присоединяет одну, и только одну аминокислоту, именно ту, которая закодирована антикодоном тРНК. Вообще-то сама синтетаза никогда и не смотрит на антикодон. Она только и делает, что «обнюхивает» дигидроуридиловые петли различных тРНК, и, когда находит молекулу себе по вкусу, прикрепляет к ней определенную аминокислоту, вот и все. Для каждой аминокислоты существует своя (одна или несколько) синтетаза.

Смотрите, что получается. В клетке имеются молекулы, роль которых состоит в том, чтобы научить тРНК генетическому коду. Они нагружают каждую тРНК аминокислотой и отправляют на поиски рибосомы. Можно ли в таком случае говорить, что самим тРНК известен генетический код? Нет. Их нужно обучать. Кто же их обучает? Синтетазы. А можно сказать, что синтетазы знают генетический код? Нет. Они просто подбирают аминокислоты, отвечающие форме дигидроуридиловой петли тРНК. Итак, обнаруживается, что ничто в клетке не знает генетический код.

По правде говоря, это небольшое преувеличение. На самом деле знание генетического кода как бы рассеяно. Оно распределено между всеми молекулами тРНК и синтетазами, и ни те ни другие не могут единолично претендовать на него. И все-таки есть место, где генетический код хранится весь целиком, это — ДНК. Вы, должно быть, уже давно ждете, когда мы дойдем до ДНК, которая обычно выступает главной героиней во всех историях о молекулярной биологии. Что ж, этот момент настал.

**МОЖНО** представить себе ДНК как большую, толстую и пассивную молекулу — самый настоящий «ува-лень», — которая только отдает приказы, но никогда не сонзволит сделать



Структура молекулы транспортной РНК.

что-либо сама, совсем как пчелиная матка. Как же она сумела так ловко устроиться? Обеспечив производство определенных ферментов, которые и выполняют за нее всю «грязную» работу. А как же ей удалось обеспечить производство этих ферментов? А вот как.

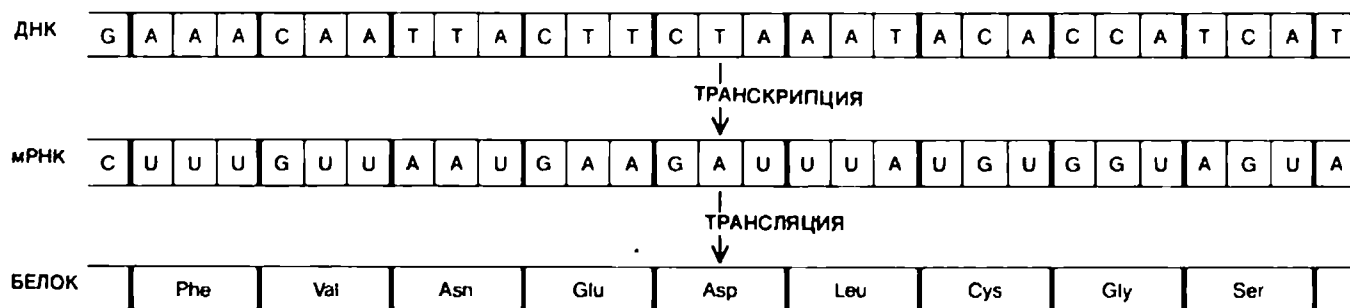
ДНК — это набор матриц для всех клеточных компонентов, как для «ува-лень», так и для «работяг». Если вы хотите узнать, откуда в клетке все берется, то ответ, очевидно, будет такой: «Все закодировано в ДНК». Участок ДНК, кодирующий какую-то определенную клеточную единицу, называется геном данной единицы. Этой единицей может быть белок, молекула тРНК или какая-нибудь РНК, которая впоследствии войдет в состав рибосомы. Какой бы это ни был компонент, для него имеется ген в ДНК. Вот почему молекула ДНК такая длинная. Даже ДНК простой бактерии состоит примерно из миллиона нуклеотидов, а у человека ДНК длиннее в тысячи раз.

Это возвращает нас к нуклеотидам. ДНК, как и РНК, состоит из нуклеотидов, но вместо урацила (U) содержит тимин (T). В ДНК А и Т, так же как С и U, комплементарны. Каждой нити ДНК

имеется комплементарная нить, которая обвивается вокруг нее, так что ДНК похожа на двойную виноградную лозу. Такая структура типична для ДНК, но не свойственна РНК, потому что А и U соединяются не так прочно, как А и Т, и витки двойной спирали РНК были бы менее стабильны, чем витки двойной спирали ДНК. РНК может скручиваться в двойную спираль только на небольших участках, а также образовывать короткие двухспиральные шпильки.

Выше я говорил, что ген какой-либо клеточной единицы представляет собой ее *кодовое выражение*. Раз имеется код, должна быть и его расшифровка. ДНК декодируется в два этапа. Прежде всего в соответствии с принципом комплементарности образуется РНК, в которой U соответствует А, А — Т, С — G и G — C. Следующий этап — расшифровка послания, содержащегося в РНК. Это дело, конечно же, рибосомы.

Если клетке нужно собрать, скажем, молекулу тРНК, требуется только первый этап расшифровки (транскрипция). Отыскивается ген тРНК, и фермент, расшифровывающий ДНК (РНК-полимераза), изготавливает соответствующий отрезок



Как генетический код мРНК транскрибируется с ДНК и транслируется с образованием белка.

зок РНК, комплементарный ДНК. Если клетке нужен белок, требуются оба этапа. Сначала, как и в первом случае, ген белка транскрибируется при помощи РНК-полимеразы. Образуется длинная цепь мРНК. Затем мРНК проходит через рибосому, и при этом синтезируется нужный белок. Вторая стадия называется трансляцией. Вспомним историю про Организацию Объединенных Наций. Получается, что господин Ну не сам сочинял свою речь. Поскольку он всего лишь посол, речь он получил на родине, от главы государства Нуклеотидия — ДНК. Господин Ну только оратор. Он читает копию речи ДНК, и эту речь послушно переводит на язык аминокислот Мари Босо, пользуясь генетическим кодом, написанным на карточках. Даже карточки были составлены по инструкциям главы государства. Теперь понятно, что я имел в виду, когда говорил, что под контролем лентяйки ДНК находится все?

В ДНК закодированы все молекулы тРНК, все синтетазы и полимеразы, не говоря уже о компонентах рибосом. Таким образом, ДНК содержит кодовое выражение своих собственных расшифровщиков! Декодируя свои гены, расшифровщики производят еще больше копий самих себя. Как видите, прямо-таки замкнутый круг. Генетический код *замкнут сам на себя*, потому что расшифровщики не могут не производить свои копии. Кроме того, они производят и ферменты, реплицирующие саму ДНК; благодаря этому новые клетки получают такую же ДНК и такой же код.

**ТАК ВОТ**, код, замыкающийся сам на себя, и кол predetermined — во все не одно и то же. Например, французский язык замкнут во Франции не только потому, что взрослые говорят друг с другом по-французски, но и потому, что они обучают французскому языку своих детей. Кроме того, издаются словари и учебники грамматики, что стабилизирует язык. Это, однако, не означает, что французский язык единственно возможный во всем мире. Не бог же дал каждой вещи ее название на французском языке. Французский язык является таким же произвольным кодом, как и любой другой человеческий язык.

Возможно ли изменение генетического кода, несмотря на то что он замкнут сам на себя? Каким образом можно его умышленно изменить? Что произошло бы в клетке, если бы реализовались мои упреждения по составлению нового генетического кода? Какой волшебной палочкой следовало бы взмахнуть над целью ДНК, если бы мне захотелось применить составленный мною код?

Проведем мысленный эксперимент. Возьмем нормально функционирующую клетку, проникнем внутрь и уберем из клетки все мРНК и тРНК. Выбросим их. Затем вернемся в клетку и удалим из нее ДНК (но выбрасывать ее не будем). В клетке останется еще много всего, в том числе ферменты и рибосомы. Однако теперь ферментам и рибосомам нечего делать, поскольку не осталось ничего, что можно транслировать или транскрибировать. Пусть подождут, мы еще вернемся. Изменив ДНК, извлеченную из клетки, введем ее в ничего не подозревающую клетку. Возможно ли, чтобы с этого момента не только данная клетка, но и все ее потомки стали пользоваться новым, со-

ставленным нами, генетическим кодом? Какие изменения нам надо произвести в ДНК, чтобы клетка продолжала функционировать так же, как и прежде, только с новым кодом?

Что означает «функционировать, как и прежде» в этом странном контексте? Это значит, что клетка должна остаться внешне такой же, как и прежде. Что определяет ее функционирование как единого целого с этой точки зрения? Ответ: ее набор белков. Белки — вот что наделяет клетку характером, индивидуальностью. Зная это, как же нам сделать, чтобы внешне клетка осталась неизменной, несмотря на то что ее внутренний язык изменен?

Как только мы введем в клетку измененную ДНК, над ней начнет трудиться множество ДНК-полимераз. Они начнут копировать ее, строя коротенькие отрезки — тРНК — и длинные цепи — мРНК. тРНК примут характерную форму буквы L. Разнообразные синтетазы, встретив новые тРНК, присоединят к ним аминокислоты. Затем рибосомы послушно используют эти нагруженные аминокислотами тРНК для трансляции мРНК. Поскольку нам нужно сделать такие же белки, как и раньше, необходимо обеспечить следующие условия: 1) новые тРНК должны воплощать новый генетический код и 2) в новых генах белки должны быть записаны в новом коде.

Обеспечить условие 1 — значит обеспечить, чтобы каждая тРНК имела правильный антикодон, соответствующий новому коду. Для этого достаточно поменять те три нуклеотида в каждом кодирующем тРНК гене ДНК, которые соответствуют антикодону тРНК. Следовательно, чтобы произвести первую серию изменений, необходимо отыскать гены всех тРНК и в каждый ген вставить новый кодон, который в результате транскрипции станет антикодомом новой тРНК.

Обеспечить условие 2 — значит просто переписать весь «текст», т.е. все гены, на новый язык.

**ТЕПЕРЬ** получится ли все так, как мы хотим? Например, станут ли синтетазы делать то, что нужно? Допустим, каждая тРНК свернется точно так же, как раньше. (Напомню, что антикодон не влияет на сворачивание тРНК, в частности не влияет на структуру дигидроуридиловой петли.) Вот приближается синтетаз и находит знакомую дигидроуридиловую петлю. Она просоединяет к тРНК ту же самую аминокислоту, которую присоединяла раньше. Фермент обманут так, как нам хотелось, и стал нашим сообщником. Согласно прежнему генетическому коду, тРНК несет антикодон, не соответствующий данной аминокислоте, а согласно новому коду, антикодон правильный.

Продумав эту схему, убеждаешься, что она действительна. Если включить в клетку кусочек «фальшивой» ДНК, то с помощью декодирующих элементов первого этапа (набора РНК-полимераз) клетка создаст новый декодирующий аппарат второго этапа (рибосомы и тРНК) и затем станет производить белки, закодированные в ДНК «чужим» способом. Все вместе эти белки придадут клетке такой же вид, какой она имела прежде, когда использовала обычный генетический код.

Итак, нам удалось доказать, что генетический код так же произволен, как нумерация Геделя. Между прочим, в митохондриях многих организмов такая пере-

стройка кода имела место! (Митохондрии — это полуавтономные внутриклеточные органеллы, которые осуществляют дыхание клетки и производят богатую энергией аденозинтрифосфорную кислоту для нужд клетки-хозяина. Они имеют свои собственные рибосомы, ДНК, тРНК и т.д.) Генетический код митохондрий очень похож на обычный; отличаются только четыре кодона. Это скорее диалект языка нуклеотидов, а не иной язык, как, например, в некоторых районах канадской провинции Квебек, где говорят на языке, который является диалектом французского языка и так же привязан к этим районам, как парижский диалект к Парижу.

В митохондриях есть собственные тРНК и собственные гены, которые в самой клетке не были бы «поняты» правильно, однако же митохондрии и клетка прекрасно уживаются, что подтверждает наше предположение.

Наша экскурсия по фабрике клетки дала лишь самое поверхностное представление о сложности взаимосвязанных механизмов, обеспечивающих жизнедеятельность клетки. Почему в клетке все так сложно и многоступенчато устроено, со множеством стадий и элементов-посредников? Помню, я как-то побывал в чикагской типографии, где печатается «Scientific American». Меня удивила многоступенчатость всех процессов. Я без конца спрашивал о колесах, шестернях, системах передач. Всякий раз оказывалось, что таким образом обеспечивалась большая гибкость процесса производства. В самом деле, первая модель механизма почти всегда несовершенна. В ней учтены только основные цели и условия эксплуатации. Со временем механизм совершенствуется и соответственно усложняется. Непосвященному человеку становится трудно в нем разбираться. Возьмем, к примеру, автомобили, самолеты, радиоприемники, телевизоры, ЭВМ, даже пианино.

С этой точки зрения не следует удивляться тому, что в клетке так много тонко сбалансированных механизмов, причем некоторые существуют только затем, чтобы исправлять ошибки других механизмов. Иногда биологи и биохимики пишут обо всем этом так, что кажется, они за деревьями не видят леса. Конечно, мои представления о живой клетке, моя манера мысленных экспериментов (которые я и попытался изложить здесь) наверняка не совпадают с представлениями специалиста. Фундаментальные труды по биохимии, такие, как замечательная книга А. Ленинджера «Биохимия», помогли мне главным образом в целом — я увидел в клеточных процессах отражение некоторых концепций из сферы обработки информации. Смело надеяться, красота такого подхода — знак его правильности.

SCIENTIFIC  
AMERICAN

ЯНВАРЬ 1932 Г. Три года назад Э. Хаббл открыл, что наблюдаемые скорости внегалактических туманностей зависят от расстояния до них. Самые далекие туманности движутся по направлению от нас быстрее всего, причем скорость удаления почти пропорциональна расстоянию и возрастает на 160 км/с на каждый миллион световых лет. Если эта зависимость справедлива и для еще более далеких туманностей, то их скорости должны быть колоссальными. Однако не так просто наблюдать далекие туманности и измерять их скорости. Ведь это чрезвычайно слабые объекты, доступные наблюдениям только с помощью очень большого телескопа и светосильного спектрографа. Даже спектрограф обсерватории Маунт-Вилсон с фокусным расстоянием 7,5 см, специально предназначенный для наблюдения туманностей, оказался слишком «длиннофокусным» для этой цели, и пришлось приспособить специальные линзы, чтобы повысить его светосилу. При помощи этого спектрографа, установленного на 2,5-метровом телескопе — рефлекторе, М. Хьюмасону удалось сфотографировать и измерить спектры более 40 слабых туманностей. Все полученные результаты превосходно согласуются с общей зависимостью, найденной Хабблом.

Дж. Ледингхэм, директор Института Листера в Лондоне, сообщил, что вирус оспы, вероятно, представляет собой мельчайшее шарообразное тельце с диаметром 1/125 000 дюйма, почти неразличимое в микроскоп. Профессор Ледингхэм приготовил практически чистые суспензии микротелца из тканей, пораженных куриной оспой и подвергшихся действию вакцины, и установил, что они специфически реагируют с сывороткой, полученной от животных, переболевших куриной или коровьей оспой. Он также показал, что в сыворотке кролика, перенесшего прививку коровьей оспы, присутствуют специфические агглютинины. Агглютинины — вещества пока неизвестной природы, присутствие которых в крови заставляет бактерии и другие инородные тельца соединяться в комочки. Профессор Ледингхэм полагает, что при тщательном исследовании довольно большой группы вирусных заболеваний растений и животных, по-видимому, могут быть найдены подобные элементарные тельца. Эти данные могли бы существенно помочь в изучении заболеваний, вызываемых несущими инфекцию частицами, которые неразличимы под микроскопом.

Предположение о том, что можно было бы достаточно легко «усовершенствовать» человека до уровня «лучших» людей, подобно тому, как человек выводит породы коров и лошадей с желаемыми свойствами, не только антинаучно — оно нелепо. Неважно, какими превосходными обилием и моральными качествами может обладать каждый из нас, так как все мы несем в себе наследие слабых (рецессивных) генов, которые маскируются генами «лучшего качества» (доминантными).

Доктор С. Райт, зоолог Чикагского университета, развел морских свинок различных видов для выявления их рецессивных генов. Он осуществил это, производя скрещивание между братьями и сестрами и создавая таким образом чистые линии. В таких линиях потенциальная и врожденная рецессивность всех видов развивается до тех пор, пока продолжается скрещивание данного типа. За долгие годы представляется возможным вывести таким путем колонию морских свинок, получив потомство чистой породы. Для этого животных, имеющих какие-либо дефекты, можно было бы умерщвлять или не препятствовать их естественной смерти, а ценные особи скрещивать, обеспечивая тем самым породу морских свинок более совершенную, чем все существовавшие до сих пор. Возможно, это и так, но подобный метод нельзя использовать применительно к человеку, и мы не можем умышленно разводить уродов, даже если бы и знали факторы, управляющие наследственными интеллектуальными признаками (но мы их не знаем), или создать обладающий наиболее высокими качествами тип человека (что, вероятно, мы сделать не в состоянии).



ЯНВАРЬ 1882 Г. В последующие несколько лет, по всей видимости, возрастает интерес к методам проверки качества всех видов пищевых продуктов, напитков и лекарств. Некоторые штаты недавно приняли законы, санкционирующие официальное проведение анализа этих изделий, где бы они ни продавались. За прошедшие один-два года всеобъемлющие законы такого рода были приняты в шт. Висконсин и Нью-Йорк. В последнее время в ряде штатов введена официальная проверка отдельных изделий. Так, в шт. Индиана обязательным является анализ всех удобрений, поступающих в продажу, и всех масел, включающих нефтепродукты, в шт. Мэн — уксуса, в шт. Массачусетс, Невада и Нью-Джерси — молока, в шт. Огайо — молока, масла, сыра, мяса, а также удобрений. Как правило, в Америке не пользуется популярностью контроль обычных торговых сделок. Законы, которые были приняты в силу все возрастающей необходимости защитить общество от продажи некачественных товаров, до самого последнего времени не содержали никаких положений, контролирующих торговлю, и ограничивались лишь штрафами или иными наказаниями за любое мошенничество и то только при условии, что покупатель мог доказать свою правоту. Однако такие законы не помогали покупателю предотвратить обман. Допустим, покупатель купил какой-нибудь продукт — кофе, сахар или молоко, — имеющийся в массовой продаже. Он может оценить качество этого продукта только дома. Если он обнаружил, что молоко разбавлено, в сахар подмешан песок, а зерна кофе пережарены или весьма плохого качества, то он имеет право жаловаться, но в подтверждение своей жалобы должен предъявить соответствующие доказательства. Если новые законы начнут энергично проводить в жизнь, то это при-

ведет к поискам простых и надежных способов, позволяющих вскрывать подобные злоупотребления в торговле.

Группа весьма известных предпринимателей организовала компанию «Газ лайт корпорейшен» по добыче и транспортировке газа по трубопроводам в города, расположенные на востоке страны. В местах добычи уголь можно купить по цене 55 цент. за 1 т, а в городах газовые компании платят за него 4,62 долл. за 1 т. Затраты на перекачку газа возмещаются стоимостью кокса.

Повышается спрос на газовые двигатели для динамо-машин (электрогенераторов постоянного тока). Хорошо известно, что при сжигании угля теряется энергия; это обусловлено двумя основными причинами. Слишком много энергии, выделяемой при сжигании угля, расходуется на превращение воды в пар, так что даже теоретически идеальный двигатель не может использовать более 1/5 всей этой энергии. Кроме того, обычные топки плохо пригодны для экономичного осуществления двух различных протекающих в них процессов: превращения угля в газ и одновременного сжигания газа в качестве топлива. Когда эти процессы разделены, газ производится должным образом и сжигается экономично, но такое усовершенствование дает меньший экономический эффект, чем удается достигнуть при прямом способе получения энергии в газовых двигателях, где газ сжигается при помощи взрыва. Названные проблемы и экономия, ожидаемая при распространении этого способа получения энергии, заслуживают внимания инженеров-механиков и изобретателей.

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

Г. Хермен

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ПО ПРОЕКЦИЯМ.  
Основы цифровой  
томографии**

Перевод с английского

Первая фундаментальная монография известного американского ученого, в которой обобщаются и подробно излагаются математические методы построения алгоритмов реконструирования на ЭВМ.

Для специалистов в области рентгенокопии, диагностики заболеваний и вычислительной техники.

1983. 22л. Цена 3р. 40к.



# Лазеры в промышленности

Лазерные установки широко применяются для сверления, резки, сварки, закалки и легирования материалов.

Их уникальные возможности требуют нового подхода к самому изделию и процессу его изготовления

АЛЬДО В. ЛА РОККА

ОДНИМ из основных параметров лазерного излучения является интенсивность. Слово «лазер» (*laser — light amplification by stimulated emission of radiation*) обозначает усиление света при помощи стимулированного излучения, которое вызывает лавину фотонов (квантов электромагнитного излучения) в виде узкого пучка света. После изобретения лазера в 50-х годах было признано, что интенсивные лазерные пучки можно с успехом использовать для промышленной обработки материалов. Это потенциальная возможность в настоящее время превратилась в хорошо разработанную технологию.

За последние десять лет высокоомощные лазеры нашли применение во многих производственных процессах: при сварке деталей автомобилей, электронных устройств и медийных инструментов; при закалке деталей автомобилей и самолетов для улучшения свойств их поверхности; при резке листового металла и сверлении небольших отверстий для охлаждения (0,18 — 1,27 мм) в деталях самолета. Во всех этих процессах лазерные установки способствуют повышению эффективности и снижению стоимости производства. Принимая во внимание те возможности, которыми обладают лазеры, находящиеся в настоящее время в стадии разработки, можно утверждать, что в следующем десятилетии лазерная технология найдет также широкое применение во многих других производственных процессах.

В промышленных установках лазеры служат в основном в качестве устройств, способных создавать чрезвычайно большие плотности энергии на поверхности обрабатываемого изделия. С этой точки зрения они обладают большими преимуществами по сравнению с такими источниками тепла, как факел пламени, паяльная лампа, электрическая дуга и плазменная горелка. К этим преимуществам можно отнести изготовление изделия более высокого качества (с точки зрения получения лучших параметров и уменьшения числа компонент, которые должны быть подвергнуты вторичной обработке или зачистке); снижение затрат на материалы, труд рабочих и обработку изделия; повышение производительности (с вытекающими из этого сокращениями производственных площадей и снижением стоимости); улучшение условий труда, а также гибкость и универсальность самого лазера и промышленной установки, основанной на нем.

В настоящее время лазеры подразделяются на два класса: маломощные и мощные. Эта классификация зависит главным образом от мощности излучения. Маломощные лазеры обладают мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен ватт. Они применяются для резки и свер-

ления керамических подложек в электронной промышленности, сверления отверстий в рубинах для часовой промышленности и резки не только металла, но также ткани, пластмасс и дерева в ряде других отраслей промышленности. Многие из этих лазеров представляют собой небольшие по размерам твердотельные устройства. К ним относятся рубиновые лазеры (длина волны излучения 0,69 мкм), лазеры на стекле, легированном неодимом (длина волны излучения двух последних лазеров равна 1,06 мкм и лежит в инфракрасной области спектра). Лазерное излучение с такими длинами волн хорошо взаимодействует с большинством металлов, поэтому эти лазеры можно применять для сварки, сверления отверстий, резки и тепловой обработки материалов. Лазеры на рубине и неодимовом стекле обычно работают в импульсном режиме, облучая поверхность обрабатываемой детали сериями импульсов с высокой частотой повторения и большой энергией. Лазеры на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом, могут работать как в непрерывном (стационарный луч), так и в импульсном режимах, генерируя по меньшей мере несколько тысяч импульсов в 1с.

К маломощным лазерам относятся также некоторые газовые лазеры (на аргоне и двуокиси углерода), которые работают главным образом в непрерывном режиме. Луч, испускаемый газовым лазером, почти полностью коллимирован, т.е. он имеет малую расходимость (этим свойством не обладает, например, излучение лампы-вспышки). Следовательно, луч большой мощности может быть сконцентрирован в небольшом пятно размером он нескольких микрометров до долей миллиметра). Эти характеристики лазерного излучения (мощность и малая расходимость пучка) особенно важны при сварке, когда требуется большая глубина проникновения энергии в обрабатываемый материал. Более подробно этот вопрос рассмотрен ниже. Газовые лазеры обладают довольно большим к.п.д. Для лазера на двуокиси углерода к.п.д. может составлять 15% (отношение мощности лазерного излучения к мощности источника питания).

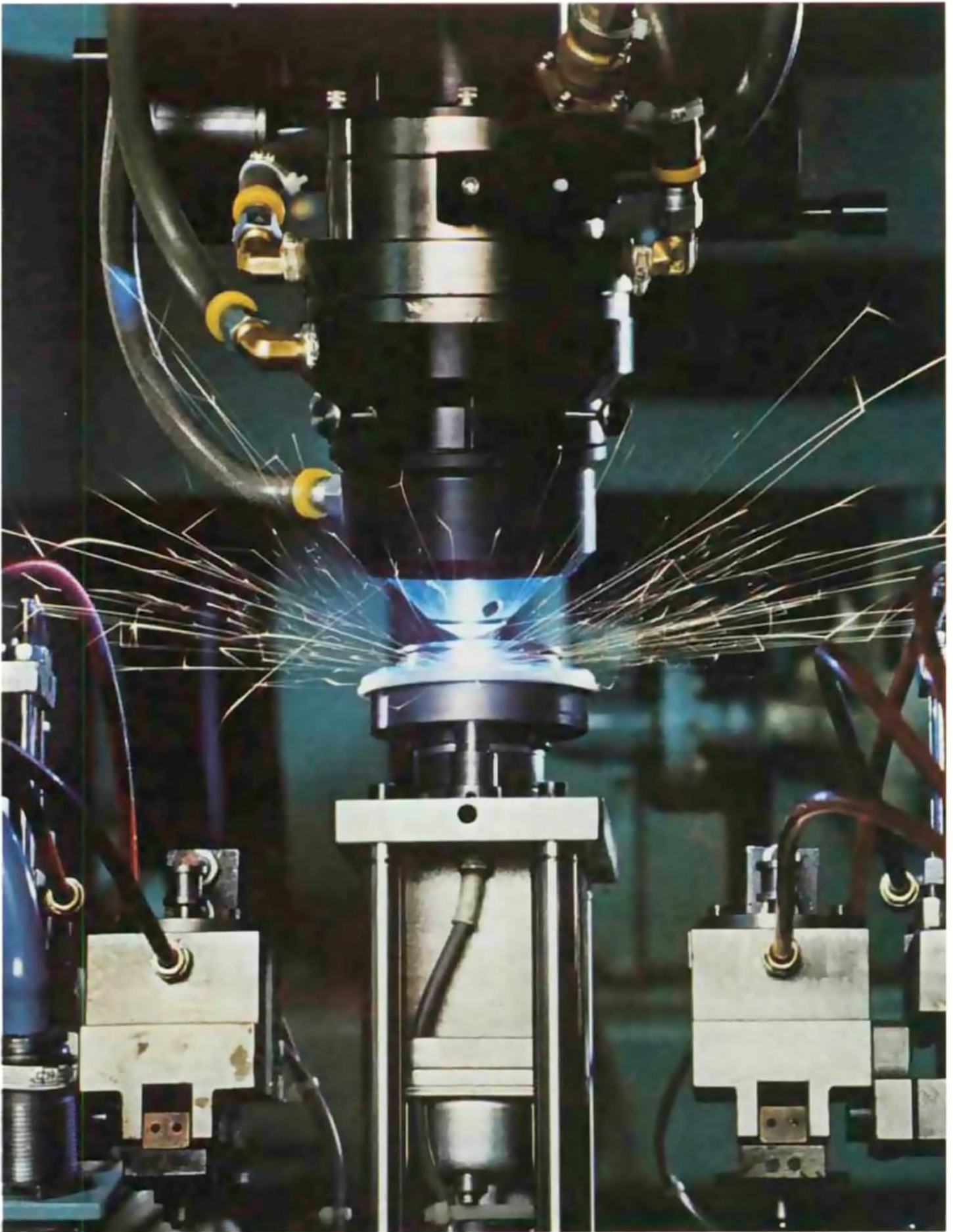
Мощные лазеры имеют мощность от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт. В настоящее время, однако, лишь экспериментальные или лабораторные лазерные установки обладают мощностью, превышающей 20 кВт. В промышленности мощные лазеры применяются при выполнении трудоемких операций: при сварке трубопроводов и деталей автомобилей, а также при закалке поверхностей таких деталей, как коленчатый вал и стенки цилиндров больших дизельных машин. Лазерная обработка придает твердость поверхности, увеличивая изно-

стойкость детали. В большинстве случаев для таких операций используются газовые лазеры на двуокиси углерода, работающие в непрерывном режиме.

МОЩНЫЙ поток электромагнитной энергии, генерируемый лазером и падающий на поверхность детали, поглощается во внешнем слое толщиной приблизительно 10 нм (0,000001 мм). Таким образом, в тонком слое образуется мощный источник тепла. Преимуществом применения лазера является то, что тепловая энергия, выделяющаяся в детали, поддерживается на постоянном уровне и концентрируется в той области, где должна быть выполнена работа. По этой причине к.п.д. высок и в 10 — 1000 раз превышает к.п.д. обычных установок, которые нагревают существенно большие объемы детали. Следовательно, лазерные установки позволяют значительно сократить время и провести высококачественную обработку.

Другим важным преимуществом применения лазера является то, что лазерное излучение не разрушает деталь, поскольку благодаря высокой плотности лазерного луча тепловая энергия выделяется за меньшие промежутки времени, чем при использовании обычных источников тепла. Следовательно, тепловая энергия не успевает проникнуть в глубь обрабатываемой детали. Обычные источники тепла расположены на значительно больших расстояниях, чем это необходимо, от обрабатываемого материала, а это приводит к появлению термически наведенных деформаций, трещин или напряжений, которые могут разрушить деталь, что в свою очередь повлечет необходимость изготовления детали заново или ее зачистки либо ухудшение ее параметров. Экономическая выгода применения лазеров очевидна в случае обработки дорогостоящих незаконченных деталей, таких, как шестерни, зубцы которых нуждаются в закалке, лопасти турбин воздушнореактивного двигателя, в которых требуется просверлить охлаждающие отверстия, а также детали двигателя, внутреннюю поверхность цилиндра которого необходимо закалить.

Все эти преимущества являются следствием чрезвычайно высокой плотности мощности лазерного луча. Благодаря некоторым другим достоинствам лазер оказывается очень гибким инструментом, и его применение часто дает хорошие результаты, даже если уровень его мощности такой же, как у обычных источников энергии. Лазерный луч не обладает массой, им можно управлять, и его легко перемещать. Лазерный луч легко использовать в автоматических процессах. Он воздействует на расстоянии, устраняя или упрощая проблемы, возникающие при ме-



**ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА** синхронизирующего кольца шестерни коробки передач автомобиля [Mirafiori plant, Fiat Auto Division, Турин (Италия)]. Лазерный луч, который невидим, поступает через конусообразное сопло на конце сварочной головки непосредственно над вспышками. Последние вызваны взрывообразной абляцией поверхностных примесей в течение первого (скрепляющего) прохода, выполняемого путем одного поворота рабочей заготовки

под лучом лазера (скорость вращения равна 75 об/мин). Видно несколько вспышек за время второго поворота, который сразу следует за первым (при скорости вращения 25 об/мин) и в процессе которого производится сварка на глубине. Пучок генерируется лазером на двуокиси углерода мощностью 2,5 кВт, изготовленным фирмой Spectra-Physics.

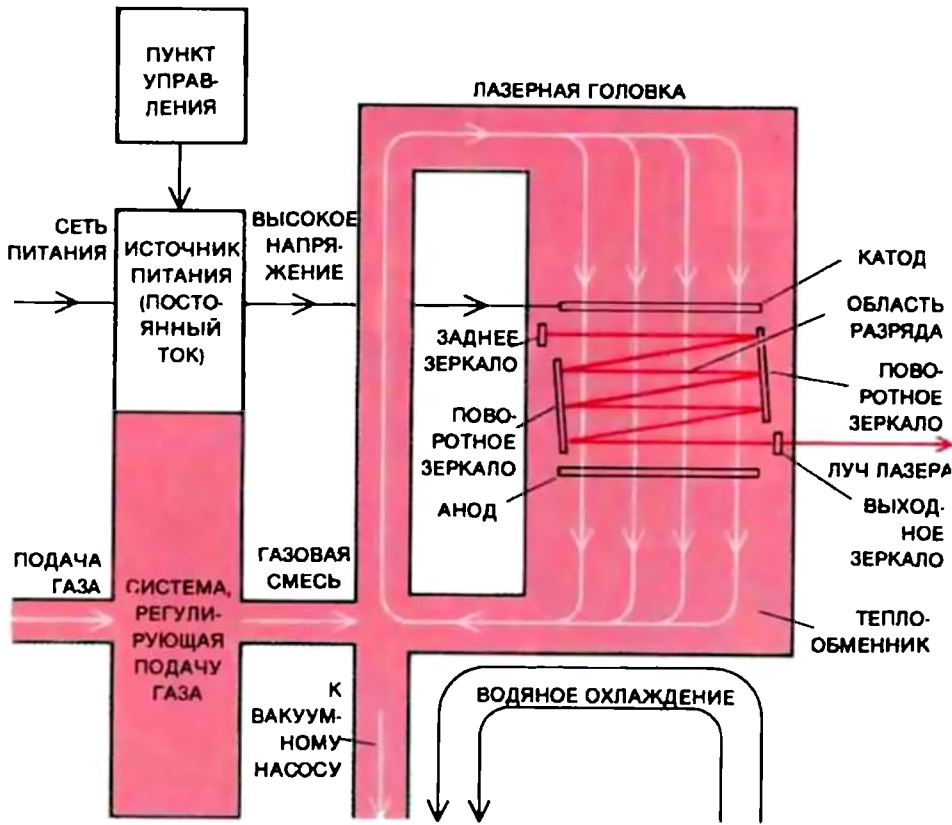


СХЕМА ПРОМЫШЛЕННОГО ЛАЗЕРА, генерирующего непрерывное инфракрасное излучение мощностью 1200 Вт. Лазер с прокачкой газовой смеси разработан фирмой Spectra-Physics. Смесь двуокиси углерода, азота и гелия возбуждается электрическим разрядом между анодом и катодом трубки. В результате происходит заселение верхних энергетических уровней (предшествующее возникновению лазерной генерации). Лазерный луч усиливается за семь проходов между зеркалами резонатора. За это время газовая среда нагревается и продвигается к теплообменнику, где происходит ее охлаждение. Газ прокачивается с большой скоростью в замкнутой системе, в которой он последовательно возбуждается, внося вклад в лазерный луч, и охлаждается.

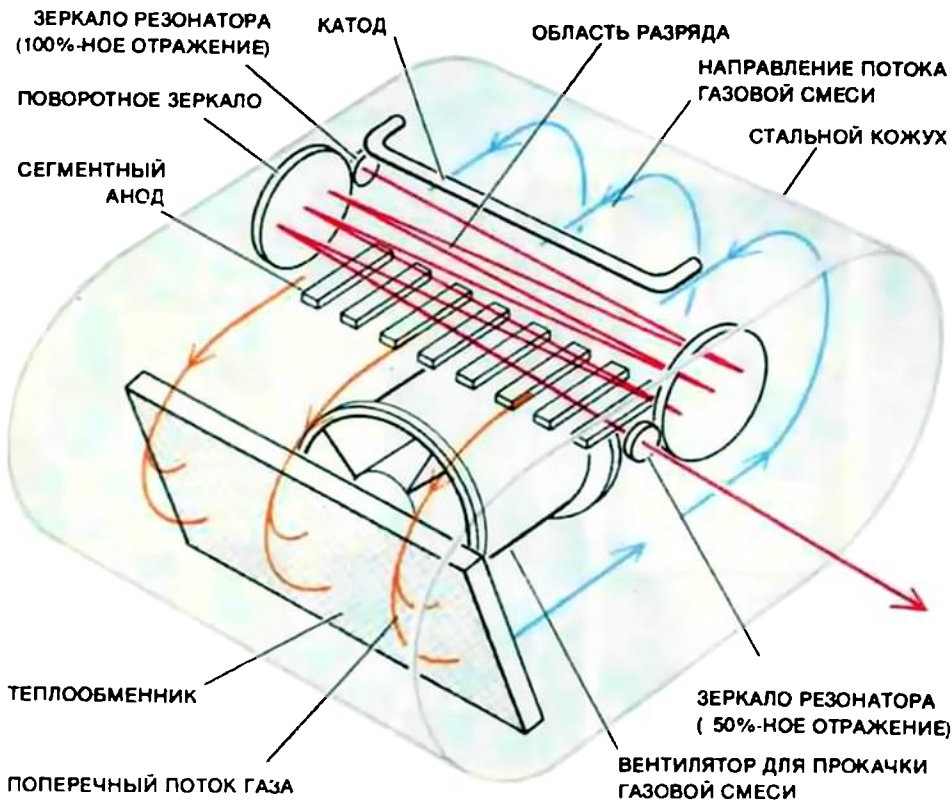


СХЕМА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ в установке мощностью 1200 Вт с прокачкой газовой смеси (с циркуляцией газовой смеси и многократным прохождением лазерного луча). После прохождения через выходное зеркало лазерный луч направляется на рабочую головку установки для выполнения операций сварки, резки, сверления или закалки.

ханической обработке. Кроме того, лазерный луч не создает механических напряжений, поэтому заготовка детали не вибрирует и ее не надо закреплять. Наконец, лазерная технология создает благоприятные условия для работы на конвейере, так как обработка лазерным лучом осуществляется быстро и без отходов. Поэтому лазерная технология имеет большое значение для материально-технического обеспечения также и с точки зрения уменьшения габаритов производственной линии.

Эти преимущества лазеров становятся очевидными при рассмотрении конкретных производственных процессов, в которых применяются лазерные установки. Ниже описаны применения лазеров в промышленности в соответствии с очередностью признания их целесообразности, начиная с операций сверления отверстий и зачистки заусенцев и кончая резкой, сваркой и закалкой.

**ПРИ СВЕРЛЕНИИ** и снятии заусенцев с помощью лазера происходит удаление материала. Процесс сверления с помощью лазера является дорогостоящим с точки зрения затрат энергии, поскольку материал должен быть расплавлен и затем доведен до испарения. (Удаление материала в жидкой фазе представляет трудность, если глубина отверстия более чем в два раза превышает его диаметр.) Для большинства металлов процесс испарения требует в десять раз больше энергии, чем плавление.

Следует отметить, что горячий пар, который быстро перегревается в результате воздействия на него лазерного луча, очень легко переходит в возбужденное состояние и ионизируется. Для ионизации пара требуется по меньшей мере в 100 раз больше энергии, чем необходимо для плавления большинства металлов. Ионизованный пар смешивается с газообразной окружающей средой, в результате чего образуется сгусток плазмы (ионизованный газ). Этот сгусток плазмы поглощает, отражает и рассеивает лазерное излучение, в конечном счете препятствуя попаданию излучения на рабочий участок детали. Это явление называется экранированием. Для его устранения обычно в качестве окружающей среды используют инертный газ, например аргон или гелий или их смесь. Они лучше пропускают излучение и труднее переходят в возбужденное и ионизованное состояние.

Было установлено, что при сверлении, когда работа производится при более высоких плотностях мощности, обычно обеспечиваемых импульсными лазерами, можно эффективно использовать процесс образования плазмы и явления, связанные с образованием сгустка плазмы. С их помощью можно инициировать процессы, подобные процессу горения, а при увеличении мощности — процессу детонации, поддерживаемые лазерным излучением. Давление и ударная волна, возникающие в результате движения плазмы от отверстия с высокой скоростью (со сверхзвуковой при детонации), способствуют удалению расплавленного материала и твердых компонент, таких, как окалина, окислы и нитриды. Для сверления наиболее часто используют твердотельные лазеры, поскольку в них легче осуществлять управление импульсами, чем в газовых лазерах.

Из всех рассматриваемых применений лазеров сверление отверстий остается до-



рогостоящим процессом. Следовательно, промышленное применение лазера в этом случае оправданно лишь для сверления малых отверстий в материалах, которые трудно поддаются обработке механическими средствами. Эти материалы либо перегружают инструмент из-за слишком большой твердости, либо являются абразивными материалами или настолько мягкими, что невозможно сделать в них отверстия с высокой точностью. При обработке подобных материалов лазеры благодаря своим неоспоримым преимуществам почти полностью заменили традиционные способы сверления.

Сверление отверстий с помощью лазера имело наибольший успех при обработке рубинов для часовой промышленности. Лазеры широко используются также для сверления отверстий в алмазах, применяемых в качестве фильер для волочения проволоки. В электронной промышленности лазеры применяются при сверлении и резке керамических подложек

для интегральных схем, а также при подгонке номиналов параметров таких схем и дискретных электронных компонент. В авиационной промышленности лазеры используются для сверления отверстий в деталях, изготовленных из исключительно твердых материалов. К этим деталям относятся лопасти турбин и обшивки камер сгорания. Лазеры применяют также для сверления отверстий в сосках для детских бутылочек, плоских точилах и полиэтиленовых трубках, а также в пластиковых вентилях для аэрозольных баллонов.

Во всех этих операциях основной задачей является получение отверстий малых размеров. Следовательно, затраты на энергию для сверления с помощью лазера низки по сравнению с затратами на другие производственные операции. Более того, несмотря на то что первоначальная стоимость лазерной сверлильной установки высока, затраты на нее быстро окупаются благодаря высокой производительности и тому, что отпадает необходимость

использования нескольких других дорогостоящих станков.

Сверление с помощью лазера остается слишком дорогостоящим процессом в случае обработки деталей для тяжелой промышленности, так как большое количество материала идет в отходы. Тем не менее лазерные установки предпочтительны и в этом случае, если их использовать на конечной стадии сверления и снятия заусенцев в несквозных отверстиях, т.е. таких отверстиях, которые не проходят сквозь толщину материала. Подобное отверстие, просверленное механически, обычно содержит стружки и заусенцы, которые остаются на его стенках после того, как из отверстия удаляется сверло. С помощью лазера их можно устранить и выполнить окончательное сверление в том случае, когда механически удалить стружки и заусенцы сложно из-за того, что обрабатываемый участок детали труднодоступен или инструмент может нарушить чистоту обработки по-



УСТАНОВКА для сварки и резки, а также для закалки поверхности металлических деталей, содержащая лазер мощностью 15 кВт (из первого поколения лазеров, разработанных фирмой Avco Everett). Правая задняя часть установки предназначена для сварки и резки. Проводимая операция — сварка листов нержавеющей стали толщиной 1,25 см со скоростью 62,5 см/мин

при мощности луча лазера 7,5 кВт. Лазер генерирует непрерывное излучение в инфракрасной области спектра, которое направляется через телескоп вниз на рабочую заготовку. Заготовка перемещается с помощью суппорта стандартного фрезерного станка. Мощность луча можно изменять (в зависимости от требований поставленной задачи) в диапазоне 1,5 — 15 кВт.

верхности. К изделиям, подлежащим, по-видимому, обработке с помощью лазера, относятся главный цилиндр, коленчатый вал, топливный инжектор для дизельных двигателей.

Для резки с помощью лазера требуется меньше энергии на единицу объема удаляемого материала, чем для сверления, поскольку в этом случае материал переводится только в расплавленное состояние. Жидкость затем удаляется струей газа, обтекающей деталь. Газом может быть кислород или азот, если процессы окисления или образования нитридов (которые могут сделать поверхность материала хрупкой или слишком твердой, снижая ее коррозионную стойкость) не играют большой роли. Применение кислорода, в частности, увеличивает скорость резки в несколько раз за счет экзотермической реакции кислорода с большинством металлов при высоких температурах. Этим способом можно резать сталь с высоким содержанием углерода и титановые сплавы, так как продукты реакции представляют собой твердые компоненты и легко удаляются струей газа.

Процесс лазерной резки можно легко сделать полностью автоматическим, если использовать цифровую ЭВМ. Лазерный луч в автоматическом режиме может следовать по контуру очень сложных рисунков, начиная движение от края или другого места листа материала (если это необходимо). Такого типа резка трудна и иногда невозможна, если используются механические инструменты, например алмаз-

ные шлифовальные круги, которые часто являются единственными инструментами, способными разрезать твердый материал. По этой причине лазеры, вероятно, позволяют расширить полезный диапазон таких материалов.

Лазерный режущий станок, работающий в автоматическом режиме, обладает более высокими точностью, воспроизводимостью, маневренностью и производительностью. Вклад этих усовершенствований может повысить производительность всей системы в 8 — 20 раз. Лазерные системы обладают также другими преимуществами. К ним относятся отсутствие вибрации, шума и пыли, уменьшение копоти, а также и то, что не надо покупать, создавать запас и обслуживать набор режущих головок (часто очень дорогих).

По этим же причинам лазерные станки оказываются предпочтительнее, несмотря на их первоначальную высокую стоимость, которая, по оценкам, в 2—5 раз выше стоимости обычных режущих станков. Лазерные установки имеют короткий срок амортизации (год и меньше), поэтому они находят широкое применение в процессах, связанных с резкой материала. Было подсчитано, что за один год во всем мире на производственных предприятиях устанавливается свыше 100 лазерных режущих станков, работающих в диапазоне мощностей 400-2 000 Вт.

Наибольшим успехом лазерные режущие станки пользуются при обработке листового металла с предварительным покрытием, органических волокнистых ма-

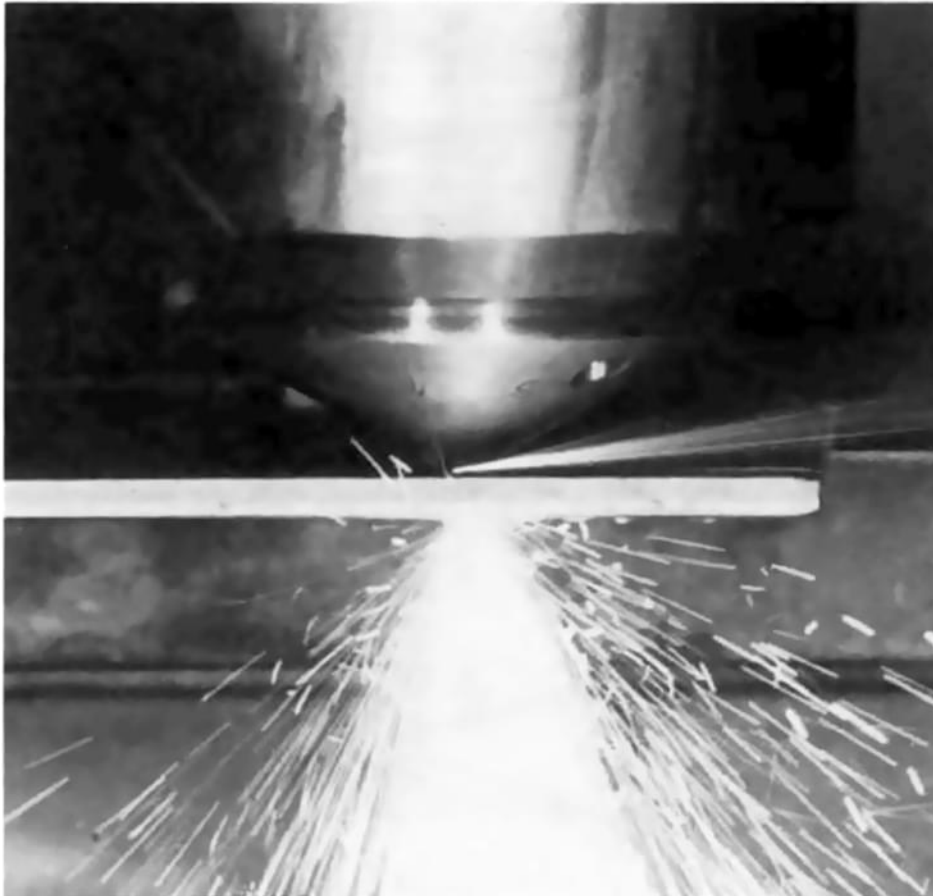
териалов (дерева, кожи, фибрового картона и текстильных тканей), пластмасс и пластиковых материалов, усиленных волоконном, резинового шланга с проволочной оплеткой, керамических материалов, кварца, стекла, биметаллических материалов и редких материалов, применяемых в авиационной промышленности. Даже в тех случаях, когда материалы легко поддаются резке, применение лазеров оказывается чрезвычайно выгодным. Рассмотрим, например, раскрой тканей при изготовлении одежды.

В этом случае часто требуется производить резку по сложным рисункам. Кроме того, желательно сделать точный раскрой с хорошо заделанными краями, так чтобы операции обработки швов, как правило необходимые для предотвращения обтрепывания, могли быть устранены. Для этих целей большой успех имело использование полностью автоматизированных лазерных систем с числовым управлением. Один слой ткани раскраивается мгновенно, при этом исключается необходимость в наложении нескольких слоев, которые слипаются друг с другом в тех местах, где производится раскрой. Благодаря высокой скорости процесса раскрой ткани для 40 мужских костюмов производится примерно за 1ч при использовании лазера с относительно низкой мощностью (200 — 400Вт).

Подобный станок, созданный в Англии (Culham Laboratory), содержит лазер мощностью 400 Вт. Его луч направляется при помощи подвижных зеркал. Луч раскраивает движущийся рулон ткани шириной 2 м при скорости подачи материала до 80 м/мин. В ЭВМ содержится вся необходимая информация о фасонах и размерах, а также об изменениях, которые могут быть внесены по заказам. В США и Англии в производстве одежды используются около 20 подобных установок.

**П**РИ СВАРКЕ лазерные установки могут работать в двух режимах: в режиме, основанном на теплопроводности, и в режиме, основанном на глубоком проникновении луча в материал. При сварке в режиме теплопроводности источник тепла расположен на поверхности заготовки детали. Температура поверхности должна поддерживаться ниже температуры испарения для того, чтобы избежать потерь материала, которые ослабили бы сварной шов. Полученные сварные швы таковы, что глубина шва может быть лишь в 1,5 раза больше его ширины. Следовательно, сварка в режиме теплопроводности служит главным образом для соединения тонких листов или пластин. Эффективность сварки в режиме теплопроводности не очень высока (к.п.д. равен 8 — 15%). Кроме того, после обработки могут оставаться довольно большие участки обрабатываемой детали, которые подвергались нагреванию.

Эти недостатки отсутствуют при сварке с глубоким проникновением тепловой энергии в материал. (Из двух режимов лазерной сварки последний имеет наиболее важное значение.) Глубокое проникновение достигается путем размещения источника тепла (области с максимальной температурой) внутри материала. Эффективность данного метода сварки очень высока (к.п.д. превышает 80%), несмотря на то что имеют место такие процессы, как испарение, возбуждение парообразного облака, его ионизация и экранирование



**ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА** (Институт исследований механических методов обработки материалов, Италия). Пластина из нержавеющей стали толщиной 5 мм подается слева направо со скоростью 1,2 м/мин под стационарно закрепленную режущую головку. Инфракрасный луч проходит через концентрическое сопло. Через него подается также кислород, который реагирует с металлом, нагретым лазерным излучением. При этом инициируется процесс горения, ускоряющий резку. Искры вызваны выбросом жидких или твердых частиц из разреза. Резка выполняется лучом лазера мощностью 2,5 кВт, разработанного фирмой Avco Everett. Мощность лазера можно изменять в пределах 1,5 — 15 кВт.

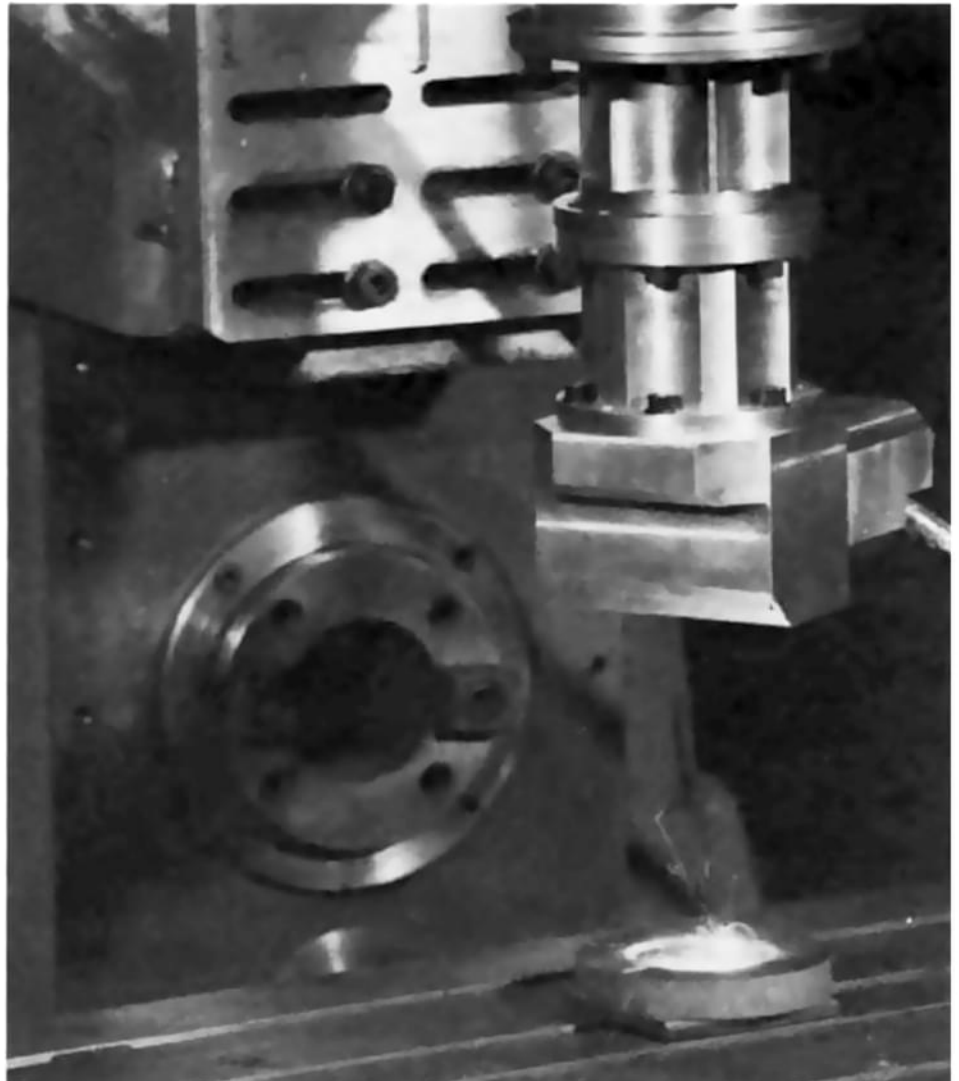
поверхности плазменным облаком. Этот факт объясняется тем, что результат взаимодействия многих сложных явлений, которые имеют место, когда источник тепла, расположенный глубоко в заготовке детали, создает ядро из перегретого пара, окруженного перегретым расплавленным материалом, оказывается довольно полезным. Ядро занимает небольшую область, которая при сварке с полным проникновением энергии простирается на всю толщину заготовки. Эта область называется «шпоночной канавкой». С помощью хорошо сфокусированного луча высокой интенсивности «шпоночная канавка» может сформироваться за несколько миллисекунд. Для формирования сварного шва канавку перемещают, поддерживая ее существование непрерывным облучением.

Расплавленный материал поднимается над поверхностью под давлением перегретого пара. Там он удерживается благодаря действию силы тяжести, за счет вязкости и поверхностного натяжения, которые способствуют образованию кромки у поверхности. Эта кромка улучшает механические свойства сварного шва. Важно также, что из-за очень высоких градиентов температуры и давления поток расплавленного материала из «шпоночной канавки» подвергается интенсивному перемешиванию. Это приводит к передаче тепла как за счет движения массы материала, так и за счет скрытой тепловой энергии при изменении фазового состояния материала (например, переход из газообразной в жидкую фазу). «Шпоночная канавка», таким образом, выполняет роль тепловой трубки, однако она во много раз эффективнее других тепловых трубок, поскольку использует скрытую тепловую энергию возбужденного и ионизованного пара, которая на порядок величины больше, чем тепловая энергия, выделяющаяся при фазовых переходах в обычных тепловых трубках.

Исключительная теплопроводность «шпоночной канавки» означает, что материал вокруг нее действует как изолятор и препятствует нежелательным потерям тепла в остальной части обрабатываемой детали. Этим явлением объясняется высокий к.п.д. лазерной сварки с глубоким проникновением энергии. Доказательством служат высокие значения отношения глубины к ширине шва (в пределах от 5:1 до 12:1) и ограниченные размеры нагреваемой области вокруг сварного шва.

**С** МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ точки зрения сварной шов, полученный при сварке с глубоким проникновением луча, имеет хорошую кристаллическую структуру с небольшими примесями. В результате такие механические свойства шва, как твердость, пределы прочности на разрыв и на удар, не уступают свойствам основного материала, а в некоторых случаях оказываются даже лучше. Высокое качество и чистота швов, полученных лазерной сваркой, были продемонстрированы на сортах стали для судостроительной промышленности и арктических трубопроводов, стали с примесью никеля и нового сорта стали с повышенной прочностью и низким содержанием примесей.

Сварка алюминия и его сплавов с помощью лазера вначале представляла некоторые трудности, поскольку в расплавленном состоянии эти материалы имели низкое поверхностное натяжение и малую



ЛЕГИРОВАНИЕ СЕДЛА КЛАПАНА с помощью лазера в центре исследований фирмы «Фиат» в Орбассано (Италия). Интенсивное выделение тепловой энергии на небольшом участке при действии лазера делает возможным легирование поверхности детали после ее изготовления. Седло клапана изготовлено из железа методом литья. Оно легируется с использованием порошкообразных элементов, выбранных для замены стеллита — сплава, содержащего 50% кобальта (дорогостоящего стратегического материала). Новый сплав исследуется с целью сравнения его свойств со свойствами стеллита с точки зрения устойчивости шестерни к воздействию окружающей среды, представляющей собой горячие и химически реагирующие выхлопные газы в области, где тарелка клапана будет часто входить в контакт с другими деталями. При таком процессе заковки лазерный луч быстро расплавляет и перемешивает легирующие элементы, что приводит к быстрой диффузии их в железо.



СЕДЛО КЛАПАНА (крупный план). Видна площадка, куда падает лазерный луч, который перемещается автоматически вокруг участка, подлежащего легированию. Материалы, используемые для легирования расплавленного железа, представляют собой порошки. Поскольку лазерный луч не имеет механического контакта с обрабатываемым материалом, положение седла клапана не фиксируется.

вязкость. При сварке листов толщиной более 3 мм оказалось, что расплав не остается на месте. Поэтому область сварного шва была слишком тонкой и пористой. Эти проблемы были решены (в соответствии с программой разработок, финансируемых НАСА) для пластин из титанового сплава и алюминия при помощи нагрева этих пластин перед сваркой. К настоящему времени осуществляется сварка пластин толщиной более 1,25 см.

Лазерная сварка обладает многими преимуществами: отпадает необходимость в сварочных стержнях, флюсах или защитных материалах; можно сваривать разнородные материалы; сводятся к минимуму деформация, внутренние напряжения и трещины, что особенно важно, если свариваются хрупкие или разнородные материалы; нет необходимости в механическом контакте между частями, подлежащими сварке (достаточно, чтобы луч лазера мог их достичь); луч может направляться при помощи зеркал, а это означает, что можно ввести его внутрь полых заготовок обрабатываемой детали. Сварные швы могут быть выполнены в труднодоступных местах, а свариваемые части не будут испытывать механических напряжений. Например, при помощи зеркал и лазерных установок были сделаны сварные швы внутри трубопроводов.

Универсальность лазерного луча, а также простота регулирования, установления направления и управления им в сильной степени облегчают работу в автоматическом режиме. Следовательно, могут быть созданы высокопроизводительные системы для управления сложными устройствами. Такое применение лазерной технологии снижает потребность в высококвалифицированных специалистах при создании сложных сварочных швов.

При лазерной сварке, однако, требуется более точное размещение деталей. Если зазор между двумя деталями, которые подлежат сварке, составляет более 25% толщины детали и при этом не добавляется наплавочный материал, сварные швы могут оказаться тонкими или пористыми. Точное размещение деталей, как оказалось, не является серьезной проблемой.

**Л**АЗЕРНАЯ сварка нашла применение в электронной и машиностроительной промышленности для решения таких задач, как соединения разнородных материалов, материалов с предварительно нанесенным на поверхность покрытием и слоистых материалов для электрических моторов, а также приварка электродов к батареям и проводов к клеммам. При этом лазерная сварка по качеству лучше обычных видов сварки, поскольку сварной шов получают при меньших затратах тепловой энергии. Кроме того, область, на которую воздействует тепловая энергия, имеет небольшие размеры. При обработке разнородных материалов металлургической очистка, полученная лазерной сваркой, препятствует образованию хрупких соединений. При лазерной сварке материалов с предварительно нанесенным на поверхность покрытием последнее удаляется с поверхности сварного шва одновременно с его формированием, в то время как при обычных методах сварки эти процессы разделены. Важно, что во время приварки электродов к батареям и проводов к клеммам с помощью лазера нагреваемая область имеет малые размеры, т.е. тепловая энергия при сварке не разрушает другие части батареи или схемы.

В качестве примера возможностей лазерной сварки может служить приварка электродов к батарее, выполненная с по-

мощью автоматической установки, изготовленной в Hamilton Standard Division, United Technologies Corporation. Установка создана на базе CO<sub>2</sub>-лазера, изготовленного фирмой United Technologies. Во время работы этой установки на трех различных заводах было достигнуто увеличение производительности в 7 — 10 раз по сравнению с обычными системами при существенном повышении качества.

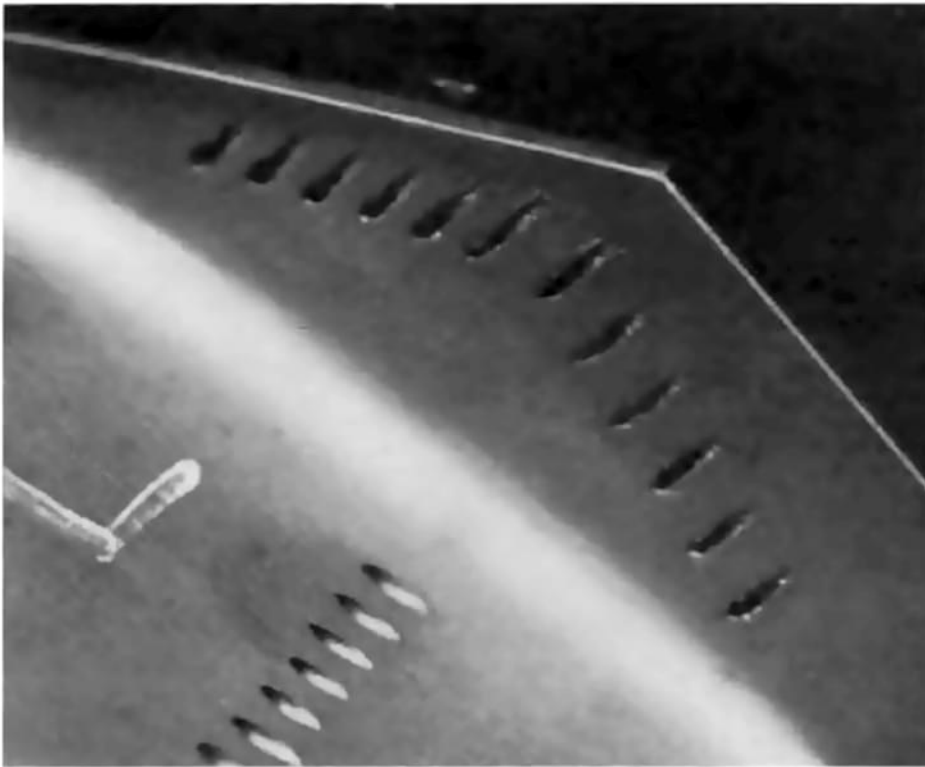
Сварка толстолистового материала, детали из которого имеют толщину больше 4 мм, находится в стадии перехода от разработки к внедрению. Ряд компаний исследуют лазеры для сварки в судостроении, при изготовлении труб, а также при создании мостов и в строительстве зданий из сборных стальных конструкций.

В авиационной промышленности некоторые сварочные операции выполнялись с помощью электронного луча. В настоящее время электронный луч заменяется лазерным, поскольку для сварки лазерным лучом не требуется вакуум, а для сварки электронным лучом обычно он нужен. С помощью лазеров осуществляются внутреннюю сварку ребер жесткости ракетных снарядов, внутреннюю сварку ограждений для приборов, сварку алюминиевых и титановых сосудов для хранения газа под высоким давлением и сварку лопаток и шестерен для газовых турбин. В автомобильной промышленности лазерные установки применяются для точной сварки крупногабаритных деталей, таких, как сцепление, картер дифференциала, шестерни, оси, датчики выхлопных газов и детали тормозов.

**И**СПОЛЬЗОВАНИЕ тепловой энергии, генерируемой лазером, для закалки поверхности деталей — очень важный процесс во многих отраслях промышленности, связанных с массовым производством. Целью закалки, каким бы ни был источник тепла, является придание поверхности детали специальных свойств, необходимых для длительной работы в требуемых условиях (таких, как большие механические нагрузки, высокие температуры и химически агрессивная окружающая среда). Два основных процесса тепловой обработки при закалке — армирование и легирование поверхности.

При армировании к основному материалу детали добавляется слой другого материала, обладающего нужными свойствами. В качестве примера рассмотрим армирование стали примесью кобальта. Для такого процесса лазерная тепловая обработка обеспечивает более высокую производительность и чистоту, а также управление с помощью полностью автоматизированной системы. В настоящее время армирование можно выполнять на заводских конвейерах, а не в отдельно расположенных металлургических цехах.

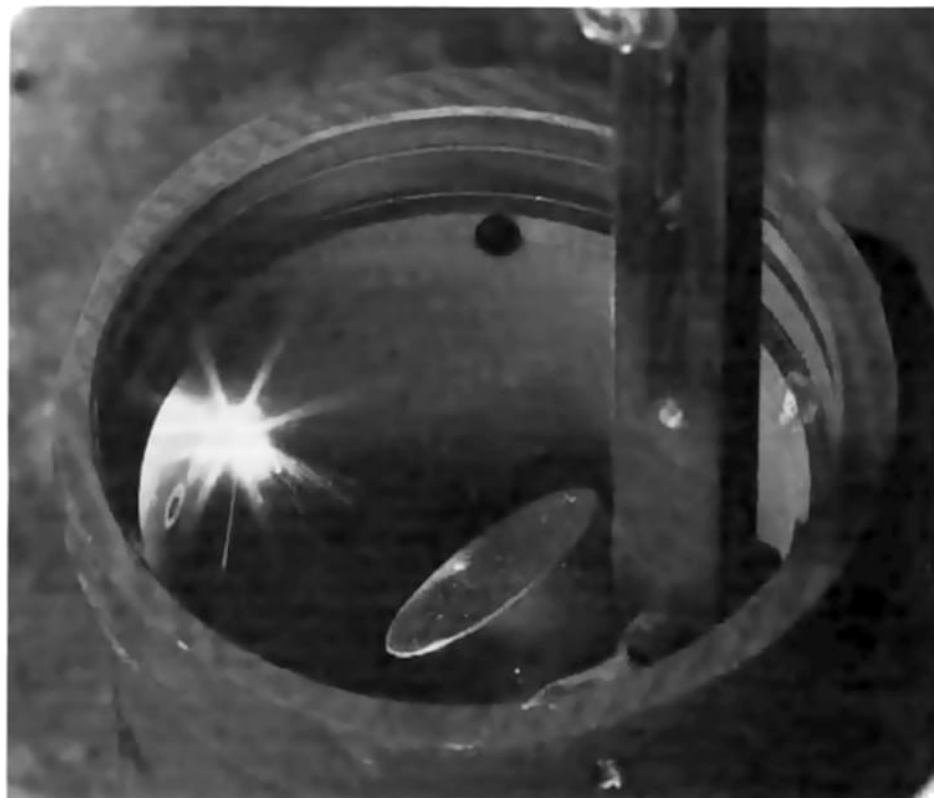
Легирование поверхности — процесс, который стал возможным в промышленном производстве лишь благодаря применению лазера. Добавляемый материал может быть в виде порошков, стержней, листов или колец из сплава или порошков самих сплавляемых компонентов, которые теперь могут быть сплавлены на месте. Значение этого процесса для конструирования и производства различных деталей очень велико. При работе с мощным лазерным лучом быстро создаются высокие температуры и градиенты температур, необходимые для легирования. Благодаря этому добавляемый материал расплавляется, сильно перемешивается и диф-



**СВЕРЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА** маленьких охлаждающих отверстий в лопатке воздушно-реактивного двигателя. Диаметр, глубина отверстий и угол ввода лазерного луча должны точно контролироваться. Сверление выполнено в Pratt & Whitney Aircraft Division, United Technologies Corporation с помощью импульсного рубинового лазера, который выделяет мощность 45 кВт к рабочей заготовке менее чем за 1 мс в течение 1 импульса. Лазер изготовлен фирмой United Technologies.

фундирует в расположенной ниже основной материал. Из-за действия мощных внешних сил достигаются очень большие скорости диффузии. В результате быстрого охлаждения легированный слой имеет тонкую микроструктуру. Более того, распределение легирующих элементов по глубине можно точно проконтролировать путем соответствующего подбора условий, при которых происходит выделение тепловой энергии лазерного луча.

Поверхностное легирование с помощью лазерных установок — важный процесс, поскольку в результате получаются детали значительно более высокого качества. Этот процесс, кроме того, дает большой экономический эффект, так как сильно сокращается расход дорогостоящих материалов (при использовании лазера последние добавляются лишь на небольших участках детали, где требуется получить высокое качество). Другие преимущества использования лазера при легировании состоят в том, что легче обрабатывать весь материал и что при окончательной обработке детали удаляется лишь небольшое количество твердого легирующего материала (часто в качестве инструмента для такой операции служит дорогостоящий алмазный шлифовальный круг, поскольку твердый материал невозможно обработать другим способом).



**ЗАКАЛКА** внутри картера ведущей силовой шестерни с помощью лазера (Saginaw Steering Gear Division, General Motors Corporation). Картер изготовлен из ковкого ферритового сплава железа. Луч  $CO_2$ -лазера мощностью 1000 Вт направляется вниз через фокусирующую линзу на зеркало, покрытое золотом и перемещающееся вверх и вниз внутри картера, для закалки поверхности на нескольких равномерно расположенных полосах. Лазерный луч невидим. Яркое пятно на фотографии представляет собой площадь расчетного отверстия, нагреваемого лазерным лучом.

**ТРЕТИЙ** важный вид закалки — фазовое превращение, при котором поверхность может приобрести закалку (без добавления материала) путем перевода из одной твердой фазы материала в другую, более твердую. Чтобы не получить хрупкой детали, важно не допустить проникания процесса закалки в деталь на слишком большую глубину. Обычно слой толщиной в несколько миллиметров достаточен для обеспечения необходимой твердости. Такая же толщина оказывается достаточной для достижения состояния нормального напряжения сжатия, которое улучшает сопротивляемость детали усталости материала.

При закалке поверхности с помощью лазера создается профиль распределения температур, который выбирается таким, чтобы температура поверхности была ниже точки плавления, и инициируется фазовый переход в образце на нужную глубину. Поскольку тепловая энергия выделяется только в поверхностном слое, деталь быстро остывает за счет более низкой температуры остальной ее части. Эта быстрая самозакалка обеспечивает мелкозернистую структуру обработанного слоя. В экстремальных случаях, например в случае обработки, известной как лазерная полировка, поверхностный слой становится полностью аморфным или стекловидным.

Упрочение поверхности методом фазового перехода — единственный метод тепловой обработки, выполняемой в настоящее время с помощью лазеров в промышленном масштабе. Основной режим работы был выработан в Saginaw Steering Gear Division, General Motors Corporation. Около 20 лазерных систем производят закалку направляющих поверхностей в картере ведущих силовых узлов со скоростью, которая может достигать 30 000 деталей в день. Фирма General Motors (Electromotive Diesel Division) имеет несколько лазерных систем мощностью 5кВт, которые производят закалку внутренних стенок цилиндрических муфт, отлитых из железного сплава, для больших

дизельных двигателей, изготовленных на заводе.

Несмотря на то что рассмотренные выше достижения производят большое впечатление, они представляют собой лишь небольшую часть того вклада в промышленность, которого можно ожидать от применения лазерных установок. То, что мы имеем в настоящее время, является первым поколением лазерных установок с низкими уровнями мощности (200–2000Вт). Становятся доступными более мощные лазеры, которые пополняют ассортимент лазеров, уже работающих на производственных конвейерах. Очевидно, что надежные лазерные системы с диапазоном мощностей 10–12 кВт окажут огромное влияние на отрасль, представляющую большой интерес для экономики промышленно развитых стран, а именно на отрасли, связанные с массовым производством продукции. Для реализации такого перехода необходимо провести подготовительные работы не только в плане разработки усовершенствованных лазерных систем, но также и в плане пересмотра всего диапазона промышленных процессов, чтобы иметь уверенность в том, что используются все потенциальные возможности новой технологии (с учетом производительности и универсальности).

Новизна такой лазерной установки, в основе которой лежат достижения науки и технологические приемы, неизвестные современному поколению инженеров, будет тормозить ее внедрение в обычные производственные процессы. Следовательно, необходим практический подход, который начнется с относительно простых применений, гарантирующих успех. Вероятнее всего, это будут одноцелевые

применения, основанные на сочетании нескольких благоприятных характеристик лазера, а не применения с наращиванием производственных возможностей лазерной установки.

Одновременно необходимо готовиться к второй фазе разработки многоцелевых универсальных лазерных систем, полностью использующих возможности повышения производительности. Несмотря на то что результаты, достигнутые в настоящее время, считаются существенными, они представляют собой лишь часть потенциальных возможностей лазерных установок. Современные промышленные системы пока не способны воспринять более высокие темпы роста производительности, в частности, это касается металлообрабатывающей промышленности, где применение лазеров может оказать наибольшее влияние.

Ситуация изменится коренным образом, когда изделие и установка будут составлять единую систему, которая полностью использует преимущества лазерной технологии. По замыслу это будет хорошо сбалансированные высокопроизводительные многоцелевые рабочие конвейеры с одной лазерной системой второго поколения. Лазерная система располагается в центре комплекса и перемещается по мере необходимости, а также выполняет все металлообрабатывающие операции для всех линий подачи изделий. Таким образом, чрезвычайно высокая производительность лазеров, которая иногда кажется бесполезной в современных промышленных установках, будет использована должным образом и революционизирующий вклад лазерной технологии будет полностью оценен.

## Университетские исследования и бизнес

**СОЗДАЕТ** ли угрозу фундаментальной науке стремление должностных лиц и профессорско-преподавательского состава университетов извлекать прибыль из использования результатов исследований в промышленности? Этот вопрос возник по крайней мере в связи с двумя событиями, имевшими место в последнее время. Гарвардский университет принял ряд положений, регулирующих конфликты интересов и определяющих обязательства в исследовательской деятельности, так как все больше университетских сотрудников вовлекаются в коммерческие предприятия, особенно в области биотехнологии. Станфордский университет запатентовал технологию работы с генетическим материалом и продал право на ее промышленное использование.

Все это происходит на фоне сокращения федеральных ассигнований на исследования. Между тем разработка технологии включения экзогенных генов в клетку создала основу для налаживания новой прибыльной отрасли промышленности. Широкие возможности использования новой генетической технологии в промышленности стимулировали рост капиталовложений в биологические исследования частными лицами и корпорациями. По данным Н. Шнайдера (фирма «И.Ф. Хаттон и К»), частные капиталовложения в биологические исследования составили в 1981 г. около 300 млн. долл. Шнайдер указывает, что в ближайшие несколько лет финансирование исследований из частных источников, возможно, сравняется с ассигнованиями, выделяемыми на эти цели в федеральном бюджете.

Прибыльность применения достижений генетической инженерии в промышленности сейчас ясна и вкладчикам капиталов, и тем, кто в этой области работает. Некоторые исследователи установили деловые отношения с фирмами, работающими в области биотехнологии. Сотрудник Гарвардского университета У. Гилберт, который разработал методы расшифровки нуклеотидной последовательности ДНК, взял годичный отпуск в университете для выполнения ответственной административной работы в фирме «Биоген». В 1981 г. К. Анфинсен из Национального института здоровья перешел в фирму «ДНК сайенс» (созданную И. Хаттоном, в настоящее время прекратившую существование). Р. Валентин, сотрудник Калифорнийского университета в Девисе, стал вице-президентом фирмы «Калген». М. Пташине (Гарвардский университет) основал фирму «Дженетик инститют инкорпорейшн», У. Брилл (Висконсинский университет, Мадисон) сотрудничает с фирмой «Цетус корпорейшн», Т. Холл взял отпуск в Висконсинском университете и работает в фирме «Агриджнетик».

Когда научный сотрудник университета переходит работать в фирму, возникает ряд причин для беспокойства. Одна из них — вероятность вытеснения теоретических исследований, призванных углублять познание окружающего мира, исследованиями с целью получения прибыли. Беспокойство вызывает и то обстоятельство, что исследования, проводимые в фирмах, засекречены, в то время как среди ученых практикуется относительно сво-

бодный обмен информацией. Одновременно качество преподавания на уровне современных требований ухудшится, если профессорско-преподавательский состав будет меньше заниматься преподавательской деятельностью или ориентировать студентов лишь на прикладные исследования, сулящие финансовую прибыль.

Положения, недавно принятые в Гарвардском университете, направлены на разрешение этих противоречий «без лишнего осуждения предпринимательства» — в формулировке одного из его авторов П. Мартина (заместителя декана факультета искусств и наук). Согласно этому документу, сотрудник университета имеет право уделять побочной работе не больше 20% времени (фактически это всегда было неписаным правилом). Противоречащей правилам объявлена такая деятельность, как «занятие в сторонней организации руководящей должности, что может серьезно отвлечь внимание от университетских обязанностей», использование неопубликованных результатов университетских исследований для получения финансовой выгоды, передача неопубликованных данных сторонней организации для получения ею прибыли. В то же время в документе указано, что подписание студента к работе, от которой преподаватель надеется получить финансовую выгоду, «не противоречит положениям о правах и обязанностях сотрудника университета».

По словам Д. Бока, президента Гарвардского университета, правило, запрещающее преподавателям занимать руководящие посты в фирмах, было принято потому, что «некоторые обязанности несовместимы с академическим положением». Президент указал, что участие преподавателей университетов в прибыльных предприятиях, близких по характеру к их научной деятельности, представляет собой большую опасность для фундаментальных исследований, чем рост финансирования этих исследований промышленными фирмами. «Мы знаем, как контролировать двусторонние соглашения с фирмами; гораздо сложнее регулировать взаимоотношения между научными сотрудниками и фирмой, когда ученые побуждают делать деньги в ущерб науке». «Скрытие полученных результатов, направление научных исследований в коммерчески перспективные области в ущерб интересам науки — вот в чем состоит опасность таких отношений», — сказал Д. Бок.

События же в Станфордском университете касаются обязательств самого университета, а не его профессорско-преподавательского состава. Этот университет запатентовал технологию, которая позволяет рекомбинировать сегмент ДНК из вируса или плазмиды (свободного бактериального гена) с другими генами и включать его в клетку. Экспрессия рекомбинантного генетического материала может найти широкое применение в химической и фармацевтической промышленности, а также в сельском хозяйстве. Патентование новой технологии университетом иллюстрирует вопросы этики скорее в деятельности администрации университетов, а не профессорско-преподавательского состава. Первыми на основе нового открытия в промышленном масштабе будут изготовлены, вероятно, челове-

ческие гормоны, в том числе инсулин. Ответствующая технология была разработана С. Козном (медицинский факультет Станфордского университета) и Г. Бойером (Медицинский центр Калифорнийского университета, Сан-Франциско).

Бойер и Козн передали патентные права своим университетам. Лицензии неисключительного права пользования упомянутой технологией предлагаются для продажи за 10 тыс. долл. По условиям продажи лицензиат обязан ежегодно выплачивать владельцу патента 10 тыс. долл. Руководить программой будет Станфордский университет. После уплаты прямых издержек полученная прибыль будет разделена между обоими университетами. Уже проданы 73 лицензии.

Д. Кеннеди, президент Станфордского университета, указывает, что средства от продажи могут в какой-то мере восполнить снижение ассигнований на научные исследования в федеральном бюджете. Он также отметил, что одна из серьезнейших проблем, с которой сталкиваются университеты, — старение лабораторного оборудования. Это обстоятельство может стать еще одной причиной перехода ученых в хорошо оборудованные современные частные лаборатории. В результате произойдет разделение исследовательской работы и подготовки молодых специалистов, между тем их единство в настоящее время служит важным источником эффективности фундаментальных исследований. «Очень трудно не допускать чрезмерного участия сотрудников университета в частных исследованиях только с помощью административных мер. Гораздо лучше создать благоприятные условия для их работы в университетах», — сказал Кеннеди.

В ходе обсуждения участия ученых-биологов в частном предпринимательстве остались в тени факты такой деятельности представителей других наук. Например, давно и прочно установилась практика работы сотрудников университетов консультантами в промышленности. Особенно широко распространена такая практика в химии и технике, где она не сказывается отрицательно на научных исследованиях.

Часто оказывается стертой граница между бизнесом и университетскими исследованиями в области электроники и при разработке лазеров и полупроводников. Фирмы, расположенные вблизи Бостона и в Силиконе-Вэли в Северной Калифорнии, своим процветанием в значительной мере обязаны участию в их деятельности сотрудников университетов этих районов. Более того, в прошлом университеты использовали патенты своих сотрудников на рационализаторские предложения как источник дохода. Университет шт. Индиана получил значительные доходы от патента на формулу раствора фторсодержащего соединения, применяемого в зубоврачебном деле; Университет шт. Флорида продал патент на изготовление напитка «Гаторад».

С точки зрения тех, кто заинтересован в процветании университетской науки, опасность нынешнего положения не в том, что отдельные лица или учреждения обогатятся за счет теоретических исследований, а в том, что принципиальное изменение отношений между университетом и его сотрудниками или между университетом и предпринимателями осложнит саму возможность ведения таких исследова-

ний. В теоретических исследованиях в противоположность прикладным ученым должен иметь возможность изучать любой важный вопрос, возникающий в процессе работы. Свобода исследователя в значительной мере определяется независимостью университета.

В настоящее время есть два обстоятельства, создающие угрозу независимости университетов. Первое — это организация университетами корпораций с целью извлечения доходов из результатов исследований. Имеются сведения, что в нескольких университетах рассматривалась возможность создания таких корпораций со штатом из ведущих преподавателей. Пока эта идея отвергнута. Если в состав университетов будут входить организации, ставящие своей целью получение прибыли, то трудно будет исключить коммерческие соображения при найме сотрудников на работу, повышении и установлении заработной платы.

Второе — это стремление университетов получать финансовую помощь от корпораций. В результате такой финансовой зависимости университетские программы научных исследований могут оказаться сдвинутыми в сторону прикладных разработок. Обычно результаты теоретических исследований реализуются крайне медленно, поэтому корпорации выделяют на них лишь небольшую часть средств. Если наступит время, когда университеты начнут серьезно конкурировать за частные ассигнования, то теоретические исследования окажутся оттесненными в сторону и фундаментальная наука начнет приобретать прикладной характер.

### Срочно разыскиваются

**И**ЗУЧЕНИЕ элементарных частиц часто принимает форму диалога между теорией и экспериментом. Теоретики предсказывают существование нескольких новых частиц и явлений. Слово за экспериментаторами. Чтобы подтвердить предсказания теоретиков, проводятся десятки экспериментов, но ответы на поставленные вопросы заставляют себя ждать.

Предсказание, в которое верят большинство теоретиков, состоит в том, что должны существовать три частицы, называемые промежуточными векторными бозонами, которые, как предполагается, являются носителями одного из фундаментальных взаимодействий в природе. Прошло больше 15 лет с тех пор, как была выдвинута теория о существовании трех очень массивных промежуточных векторных бозонов, однако лишь к настоящему времени достигнуты достаточно высокие энергии, необходимые для рождения подобных частиц в экспериментах. Описание этих экспериментов приведено в статье Д. Клайна, К. Рубина и С. Вандермейера «Поиск промежуточных векторных бозонов» («Сайентифик Америкн», март 1982 г.).\*

Еще одно семейство частиц уже в течение пяти лет привлекает пристальное внимание экспериментаторов: оно состоит из частиц, в структуру которых включен кварк нового вида — *t*-кварк. Кварки являются составными элементами протонов, нейтрино и более чем ста других элементарных частиц. Все обычное вещество

может быть образовано из кварков всего двух видов, обозначаемых буквами *u* (*u*p — верхний) и *d* (*d*own — нижний). Вторая пара кварков, получивших обозначения *s* (*s*trange — странный) и *c* (*c*harm — очарованный), представляет собой составные части более массивных, чем протоны и нейтроны, частиц, рождающихся в экспериментах на ускорителях. В 1977 г. была открыта еще более тяжелая частица; есть веские аргументы в пользу того, что она содержит кварк пятого типа, который получил обозначение *b* (*b*ottom — низкий). Поскольку другие четыре кварка объединены в пары, физики сразу же стали искать партнера для *b*-кварка.

Недавно выдвинутые единые теории взаимодействия элементарных частиц, по крайней мере частично, подтверждают идею о существовании шестого кварка, однако не дают указаний путей его поиска. Член семейства *t*-кварков, который обнаруживается легче всего, должен был бы состоять из *t*-кварка, связанного с *t*-антикварком. Согласно первоначальным оценкам, его масса должна составлять (в энергетических единицах) порядка 27 ГэВ, или 27 млрд. электронвольт. Эта область энергий была внимательно исследована, однако ничего нового не обнаружено. Примерно год назад Ш. Глэшоу из Гарвардского университета (США) высказал предположение, что масса частицы *t*-кварк-антикварк составляет  $38 \pm 2$  ГэВ. В исследованиях, проведенных в Гамбурге на электронном синхротроне на встречных пучках, достигались энергии, несколько превышающие 36 ГэВ, однако никаких следов новых частиц не было обнаружено. Летом 1982 г. начала осуществляться программа постепенного увеличения энергии ускорителя; ожидается, что через несколько лет она достигнет 44 ГэВ.

Другие исследователи занимались поисками свободных кварков, а не кварков, объединенных в составные частицы. Свободный кварк в принципе было бы легко обнаружить, поскольку, как ожидается, он имеет дробное значение электрического заряда, равное одной или двум третям заряда электрона. Однако начиная с середины 1970-х годов теоретики пришли к единодушному мнению, что кварки никогда не могут быть изолированы в свободном состоянии. Тем не менее в 1977 г. У. Фейрбэнк с коллегами из Станфордского университета сообщили об обнаружении дробных электрических зарядов на маленьких сверхпроводящих шариках из металлического ниобия. Позднее, в апреле 1982 г., Фейрбэнк представил еще восемь результатов наблюдений частиц с дробным зарядом, сгруппированных вблизи значений  $+\frac{1}{3}$  и  $-\frac{1}{3}$  заряда электрона. Однако вопрос о том, существуют ли в природе свободные кварки или нет, далек от разрешения. Результаты экспериментов Фейрбэнка, возможно, имеют и другое объяснение. Более того, неясно, как согласовать эти результаты с результатами других многочисленных экспериментов по обнаружению кварков. Например, в серии экспериментов, проведенных Дж. Морпурго в Университете Генуи (Италия), исследовалось заведомо большее количество вещества (правда, железа, а не ниобия), но не было обнаружено никаких следов дробного заряда.

В настоящее время для поисков свободных кварков применяются новые методы. В течение нескольких лет работы Фейрбэнк и Морпурго измеряли дробный заряд

путем «подвешивания» металлических шариков в магнитном поле и смогли проверить лишь несколько миллиграммов металла. Метод, разработанный Р. Хагстрёмом из Аргоннской национальной лаборатории (США) и Г. Хиршем из Лоуренсовской лаборатории в Беркли (США), даст возможность исследовать большее количество вещества различного состава. Хагстрём и Хирш воздействуют на поток капелек электростатической силой; отклонение каждой капельки от первоначальной траектории пропорционально ее электростатическому заряду, и поэтому капельки с дробным зарядом могут быть отделены от других. При помощи этого метода можно исследовать тысячи капелек в секунду.

Цель описанных выше поисков кварков — обнаружить дробно заряженные частицы, которые могли бы оказаться в свободном состоянии внутри обычного вещества; эксперименты другого типа направлены на то, чтобы создать новые кварки или разбить сложные частицы на кварки, входящие в их состав. В одном из этих экспериментов, выполненных недавно А. Зичичи из Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве (Швейцария), было зарегистрировано три интересных события, которые могут оказаться свидетельством в пользу существования свободных кварков. Зичичи исследовал «осколки», возникающие при столкновении нейтрино высоких энергий со свинцовой мишенью. Заряженные частицы в этих «осколках» обнаруживаются по ионизации ими атомов разреженного газа. Поскольку такая ионизация пропорциональна квадрату заряда, то частицы, заряд которых составляет  $\frac{1}{3}$  заряда электрона, должны приводить к ионизации в 9 раз более слабой, чем в обычном случае. Имеются три события, удовлетворяющие этому критерию, однако их интерпретация условна.

Сами нейтрино тоже оказались в центре другой дискуссии. Существуют три типа нейтрино: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. Они лишены электрического заряда, и в течение многих лет считалось, что они имеют нулевую массу покоя. В настоящее время теория не исключает, что по крайней мере некоторые типы нейтрино могут иметь отличную от нуля, хотя и небольшую, массу покоя. Кроме того, если различные типы нейтрино, хотя бы немного, отличаются по массе, то нейтрино могло бы периодически изменять свой тип.

В 1980 г. Ф. Рейнес с коллегами из Калифорнийского университета в Ирвайне (США) объявили об обнаружении таких нейтринных осцилляций. Они расположили детектор на расстоянии 11 м от центра ядерного реактора в Саванна-Ривер (шт. Калифорния), откуда в результате ядерной реакции излучался мощный поток электронных нейтрино. Конструкция детектора позволяла выделять два разных процесса. При низких энергиях нейтрино первый процесс мог вызываться только электронными нейтрино, в то время как второй процесс мог возбуждаться нейтрино любого типа. Осцилляции, при которых нейтрино одного типа переходят в нейтрино другого типа, проявляли бы себя как увеличение интенсивности второго процесса по сравнению с ожидаемой.

Рейнес и его коллеги интерпретировали полученные ими результаты как свидетельствующие о наличии существенного усиления, откуда следует, что нейтрино

\* См. журнал «Успехи физических наук», т. 139, вып. 1, январь 1983 г. (перевод на русский язык). — Прим. ред.

этих типов должны отличаться по массе примерно на 1 электронвольт. Другие исследователи сначала усомнились в такой интерпретации, поскольку последняя зависит от расчета энергетического спектра испускаемых нейтрино. Электронные нейтрино высоких энергий могут приводить к усилению обоих процессов в детекторе и тем самым имитировать эффект осциллирующий.

В сентябре 1981 г. Ф. Бом из Калифорнийского технологического института (США) и его коллеги из того же института, Института ядерных исследований в Гренобле (Франция) и Технического университета в Мюнхене (ФРГ) сообщили о результатах своих измерений потока нейтрино из реактора. Расположив детектор на расстоянии примерно 9 м от центра реактора, они получили данные, указывающие на отсутствие осцилляций. Предполагая максимальную степень «смещения» различных типов нейтрино, эти авторы установили верхний предел для различия масс нейтрино, равный 4 эВ.

Непосредственный способ детектирования нейтринных осцилляций заключается в сравнении относительного числа нейтрино разных типов, регистрируемых на различных расстояниях от одного и того же источника. В этом случае результаты не зависят от энергетического спектра нейтрино, а флуктуации числа нейтрино каждого типа можно интерпретировать непосредственно. В настоящее время проводятся эксперименты такого типа. Бом с сотрудниками поместили детектор вблизи более мощного реактора в Гёсгене (Швейцария) и собираются измерять нейтринный поток на расстояниях 38 и 65 м от центра реактора. Группа Рейнеса изготовила новый детектор для реактора в Саванна-Ривер, расстояние которого от реактора может изменяться от 15 до 50 м. Таким образом, эта проблема, возможно, будет вскоре решена.

По-видимому, в настоящее время наибольших усилий в экспериментальной физике требуют ведущие во всем мире исследования по обнаружению распада протона — составляющей вещества, которая всего несколько лет назад считалась абсолютно стабильной. Новые единые теории предсказывают, что протон распадается, однако его среднее время жизни составляет по крайней мере  $10^{31}$  лет, что в  $10^{21}$  раз превышает возраст известной нам части Вселенной. Естественный способ обнаружить подобный распад — это наблюдение по меньшей мере за  $10^{31}$  протонами в ожидании распада одного из них. Масса  $10^{31}$  протонов равна 18 т, но на практике такие детекторы оказываются еще тяжелее. Кроме того, детекторы должны быть полностью экранированы от космических лучей, в противном случае чрезвычайно редкий сигнал, связанный с распадом протона, не удастся выделить из множества посторонних событий. Чтобы удовлетворить этим требованиям, физикам приходится спускаться под землю в глубокие шахты и туннели, где размещают громадные цистерны с водой и стопки из железных плит.

Примерно из десятка групп, работающих над проблемой распада протона, лишь одна сообщила некоторые предварительные результаты. В эту группу входили С. Мияки из Токийского университета (Япония) и ученые из Института Тата фундаментальных исследований в Бомбее (Индия) и Университета Осаки (Япония). Детектор представлял собой

набор железных плит и газоаполненных счетчиков частиц общей массой 140 т; он был смонтирован на глубине 2300 м в шахте золотого прииска Колара вблизи Бангалора в южной Индии. Год назад Мияки и его сотрудники описали три события — кандидата на распад протона, когда треки заряженных частиц одновременно выходили из точки, расположенной внутри детектора. Однако во всех трех случаях по крайней мере один из треков находился у края детектора, что усложняло интерпретацию события; в самом деле, нельзя исключить вероятность того, что треки были связаны с частицей, вторгшейся извне и столкнувшейся с атомными ядрами в детекторе.

Ввиду этого Мияки и его коллеги повторно изучили эти три события и пришли к выводу, что два из них должны быть отброшены как кандидаты на распад протонов. Все же один кандидат остается, однако одного случая недостаточно. Если подобное событие действительно имело место, то в колларовском детекторе должны регистрироваться распады протонов со скоростью, равной приблизительно одному событию в год; такая скорость соответствует времени жизни протона, равному примерно  $3 \cdot 10^{31}$  лет. Скоро вступят в строй детекторы еще большего размера. В шахте Сильвер Кинг (шт. Юта, США) исследователи из Гарвардского университета, Университета Пардю и Висконсинского университета используют в качестве активной среды 1000 т воды. В мортонских солевых копях (недалеко от Кливленда) исследователи из Ирвайна, Мичиганского университета и Бруксфевенской национальной лаборатории заполнили водой емкость в 10000 т (оба этих детектора могли бы уже действовать, если бы не утечки в пластиковых оболочках, в которые налита вода). Если время жизни протона составляет  $3 \cdot 10^{31}$  лет, то 10000-тонный детектор должен регистрировать около дюжины событий в год. Такая интенсивность событий, возможно, достаточна для подтверждения самого факта распада протона, но для выяснения механизма распада и выбора между теоретическими моделями требуется еще большее число событий.

Если время жизни протона значительно превышает  $10^{33}$  лет, то создание еще более крупных детекторов может оказаться бесполезным. Конечно, можно создать детектор с достаточно большой массой обнаружения возможного распада протона, однако при увеличении размеров детектора увеличивается и неустраняемый фон посторонних событий. Сигнал затеряется в шуме. Следовательно, среди нескольких проблем экспериментальной физики, требующих решения, вопрос о распаде протона является таким, ответ на который будет дан либо в ближайшем будущем, либо вряд ли будет получен вообще.

### Конкурентная борьба на рынке запоминающих устройств с произвольной выборкой

В ПРОИЗВОДСТВЕ микросхем, используемых в качестве функциональных блоков в ЭВМ и других электронных устройствах, с самого начала ведущее положение занимала полупроводниковая промышленность США. Но сейчас американские компании начали испытывать серьезную конкуренцию в этой области. Их конкуренты — это компании Японии. Высокоорга-

низованная и быстроразвивающаяся полупроводниковая промышленность Японии, похоже, достигла такого уровня, который позволяет ей удерживать в своих руках рынок электронных запоминающих устройств последнего поколения.

Микросхема — это небольшой кусочек кремния, на котором набор многочисленных транзисторов и других компонентов образует в совокупности законченное электронное устройство. Микросхемы выполняют различные функции. Наиболее показательным, пожалуй, является случай, когда микросхема выполняет роль микропроцессора, включающего все элементы центрального процессора ЭВМ. Но с точки зрения объемов сбыта и рентабельности производства наибольший интерес представляют микросхемы, служащие в качестве запоминающих устройств; в ЭВМ один микропроцессор обычно обслуживается десятками или даже сотнями запоминающих микросхем. В большинстве случаев такие микросхемы выполняют функции запоминающих устройств с произвольной выборкой (ЗУПВ), допускающих независимый доступ к каждому элементу памяти.

Информационная емкость микросхем памяти измеряется в килобитах, каждый из которых равен  $2^{10}$  (1024) двоичных единиц. С 1970 г. емкость таких микросхем, занимающих ведущее место на рынке сбыта, последовательно возрастала в четыре раза за каждые несколько лет: с 1К сначала до 4К, а затем и до 16К. В настоящее время осуществляется переход на микросхемы емкостью 64К, фактически содержащих по 65 536 бит памяти. Эти устройства называются динамическими потому, что информация в них хранится в виде очень малых электрических зарядов, которые надо периодически регенерировать (восстанавливать). Появление на рынке следующего поколения устройств памяти — динамических ЗУПВ емкостью 256К — ожидается примерно через три года.

Успех японских изготовителей микросхем памяти емкостью 64К можно объяснить несколькими факторами. Один из них — согласованность действий японских компаний в создании конкурентоспособной в мировом масштабе полупроводниковой продукции. Руководство этими действиями осуществляет министерство внешней торговли и промышленности. Они (эти действия) были поддержаны также правительством, которое установило пошлину на импорт полупроводниковых приборов в размере 10% (в США эта пошлина составляет 5,8%) и ограничило иностранные инвестиции в японскую промышленность. Другой фактор связан с технической политикой. В США некоторые фирмы считали, что создание микросхем памяти емкостью 64К — столь значительный скачок вперед, что нельзя будет обойтись без новых конструкторских решений и идей. Японские же компании приняли за основу тот же подход, который был использован при создании запоминающих устройств емкостью 16К, но для размещения большего числа элементов в микросхеме они пошли на уменьшение размеров самих элементов или увеличение размеров кристалла. В результате японские компании обеспечили себе, как считают многие, не менее 50% рынка микросхем емкостью 64К; по некоторым оценкам их доля еще выше и достигает 70%. Среди американских изготовителей максимальной доля рынка (около 20%) приходится на фирму «Моторола инкорпорейтид», которая тоже решила приспо-



собрать для выпуска этих устройств существующую технологию.

Американское торговое объединение — Ассоциация компаний полупроводниковой промышленности — опубликовала отчет, содержащий результаты анализа конкурентной ситуации, под названием «Международная борьба на рынке микроэлектроники». В этом отчете делается вывод о том, что американские изготовители микросхем нуждаются в помощи со стороны правительства. Ассоциация призывает начать переговоры о снижении импортных пошлин как в США, так и в Японии до 4,2% и об установлении для американских компаний в Японии условий деятельности, равных с японскими. По мнению Ассоциации, правительство США должно также ввести такую налоговую политику, которая бы стимулировала рост инвестиций и проведение исследовательских работ в полупроводниковой промышленности.

Хотя Соединенные Штаты Америки, как представляется, переживают серьезные трудности на рынке ЗУ емкостью 64К и, возможно, по тем же причинам будут испытывать давление со стороны зарубежных конкурентов и в борьбе за рынок сбыта запоминающих устройств емкостью 256К, будущее не выглядит таким уж беспросветным. Все расчеты распределения продукции на рынке сделаны с учетом только «торгующих компаний», которые продают микросхемы на открытом рынке. Но в США большое количество микросхем емкостью 64К изготавливается фирмами, специализирующимися на производстве аппаратуры, такими, например, как «Интернэшнл бизнес мэшинс корпорейшн» и «Вестерн электрик компани», которые применяют их в своих собственных изделиях. Можно считать, что эти компании первыми разработали ЗУПВ емкостью 64К и удовлетворяют свои собственные потребности в них уже около трех лет.

Рынок сбыта микросхем памяти емкостью 64К только начинает складываться, и по мере роста спроса на них рыночная ситуация может измениться. Кроме того, в США уже ведется работа по созданию микросхемы памяти, которая обгонит запоминающие устройства емкостью 256К сразу на два поколения. Речь идет о динамическом ЗУПВ емкостью 4 млн. бит (4 Мбит).

### Что увидел Левенгук

**П**ИОНЕР микроскопии Антони ван Левенгук (1632-1723) стал знаменит при жизни. И в наши дни не забыты замечательные открытия и наблюдения, которые Левенгук сделал с помощью изобретенных им однолинзовых микроскопов. Левенгук первым увидел бактерии, сперматозонды и красные клетки крови; он изучал структуру хрусталика глаза, исчерченность поперечнополосатых мышц, ротовые аппараты насекомых, тонкую структуру растений и многие другие объекты, о которых до него знали мало или совсем ничего.

До сих пор оставалось неизвестным, как, собственно, работал Левенгук. Свои наблюдения Левенгук изложил в сообщениях Лондонскому Королевскому обществу, однако в этих сообщениях (их было примерно 375) он ничего не писал о методиках исследований. В начале 1981 г. Б. Форд, член научного объединения г. Кардиффа, обнаружил в архивах Коро-

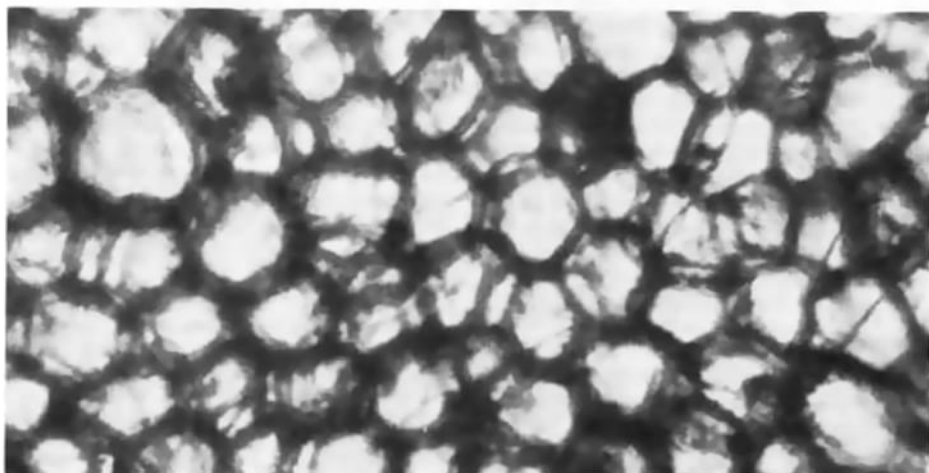
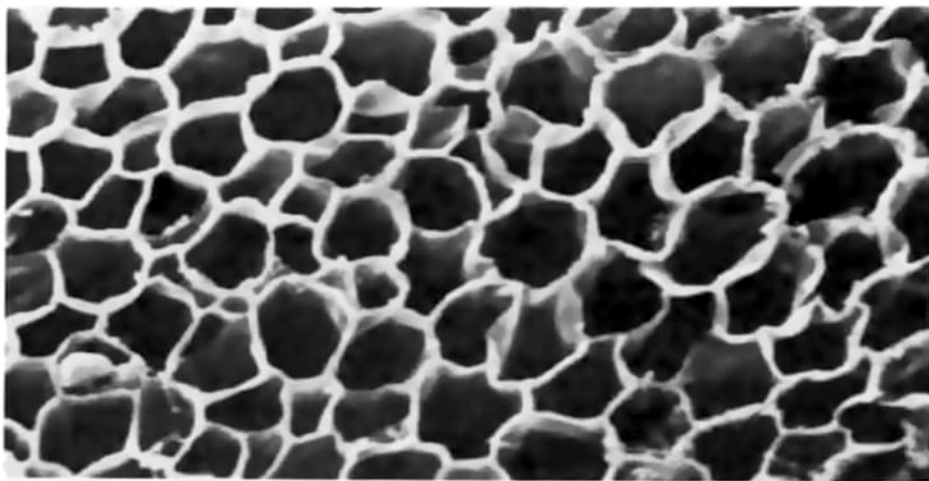
левского общества несколько препаратов, изготовленных Левенгуком. Об этой находке тогда много говорили. Недавно Форд опубликовал в «Отчетах и записках Лондонского Королевского общества» сообщение о результатах изучения левенгуковских препаратов. Форд надеялся «обнаружить сведения о работе Левенгука с неживыми образцами и о методах подготовки их для изучения». В четвертом письме Левенгука Королевскому обществу, от 1 июня 1674 г., Форд обнаружил маленький конверт, приклеенный к неиспанной оборотной стороне шестого (последнего) листа письма. Форд пишет: «Я осторожно открыл его [конверт], опасаясь обнаружить всего лишь артефакт. Внутри конверта лежали четыре маленьких пакетика. В трех из них оказались тонкие срезы, приготовленные Левенгуком для Королевского общества.

Образцы из пакетика № 1 представляли собой тонкие прозрачные срезы коры пробкового дуба (*Quercus suber*) длиной примерно от 1,5 до 7 мм. Даже беглый осмотр показал, что срезы достаточно тонки и вполне выдерживают сравнение с лучшими гистологическими препаратами, какие можно сделать в наше время вручную. В пакетике № 2 были округлые срезы сердцевинки бузины *Sambucus nigra*, приготовленные из побегов диаметром примерно 15 мм. Пакетик № 3 был пуст, но, судя по надписи, в нем раньше находился препарат гусиного пера. Образец № 4 удалось определить не сразу. По виду

он напоминал срез стебля водного растения с утолщенными наружными стенками и губчатой сердцевинной полостью. Микроскопическое исследование, однако, показало, что это срезы зрительного нерва, «полость» же образовалась в результате перерождения вещества за долгие годы хранения».

В письме, сопровождавшем препараты, Левенгук сообщал, что делал срезы острой бритвой и что «рассматривать укрепленные на игле микроскопа срезы следует в помещении, в тени». Форд подчеркивает, что эти строки «содержат сведения о способе приготовления срезов, о том, как фиксировать их на предметном столике микроскопа, а также совет пользоваться ограниченным освещением. Левенгук, очевидно, знал, что выгодно уменьшать диаметр источника света для контроля светосилы освещающего пучка».

В двух более поздних письмах Левенгука Форд нашел еще пять пакетиков с препаратами, но счел, что «они не представляют такого интереса, как первые находки. В четырех пакетиках находились лишь части когда-то цельных образцов, так что об их микроскопировании трудно что-либо сказать. Последний препарат оказался испорчен грибом». Форд провел ряд опытов, пользуясь одним из сохранившихся микроскопов Левенгука и другими микроскопами такого типа, и убедился, что Левенгук вполне мог видеть в свой микроскоп бактерии и наверняка наблюдал их.



ПРЕПАРАТ СРЕЗА КОРЫ, который Левенгук направил в 1674 г. Лондонскому Королевскому обществу; одновременно он послал и другие препараты. Б. Форд, член научного объединения г. Кардиффа, нашел эти препараты в прошлом году в архивах Лондонского Королевского общества и сделал их микрофотографии. Вверху — микрофотография среза коры, сделанная в сканирующем электронном микроскопе; внизу — так выглядит тот же препарат под самым мощным из подлинных сохранившихся микроскопов Левенгука (однолинзовый микроскоп, увеличение  $\times 266$ ).

# Массовые вымирания позднего мезозоя

*Много видов растений и животных, особенно динозавров, вымерли внезапно около 63 млн. лет назад. Тонкий слой осадков, обогащенных иридием, подтверждает, что причина может быть в падении астероида*

ДЕЙЛ А. РАССЕЛ

**О**ДНО из самых поразительных событий в летописи жизни на нашей планете — это одновременное исчезновение в конце мезозойской эры, около 63 млн. лет назад, многих групп рептилий, некоторых групп морских беспозвоночных и некоторых групп примитивных растений. Многие поколения ученых безуспешно пытались объяснить это явление. Новые факты, однако, привели теперь к новой гипотезе: исчезновения были результатом катастрофического разрушения биосферы вследствие воздействия внезапного фактора.

Катастрофизм не является новой доктриной, но он не был особенно популярен при попытках объяснить события в истории Земли. В начале XIX столетия, когда геология была еще в младенчестве, французский анатом Ж. Кювье предположил, что прошлое отмечено серией катастроф, или «революций», в природе. По его мнению, такие разрушения объяснили бы три исчезновения животных: мамонтов в конце ледниковой эпохи, многих примитивных млекопитающих, захороненных в осадках древнее ледникового гравия, и гигантских рептилий, захороненных в меловых слоях, залегающих еще ниже. Однако в последующие десятилетия работы Ч. Лайеля с очевидностью выявили, что процессы изменения в истории Земли были значительно более длительными, чем полагал Кювье. К катастрофизму интерес прошел, его сменила доктрина градуализма. Теперь, более чем через столетие, палеонтологи соглашаются с тем, что, чем бы ни были вызваны эти исчезновения в конце мезозойской эры, это не могла быть мировая катастрофа. Главной жертвой среди рептилий стали динозавры. Например, в конце мелового периода, заключительной главе мезозоя, в одной только Северной Америке обитало по крайней мере 15 отдельных семейств динозавров (возможно, от 50 до 70 видов). В отложениях, которые накапливались непосредственно после мела, не было найдено ни одного скелета динозавра. Вот почему конец мезозоя обычно характеризуют как время, когда динозавры вымерли. Однако они не были единственными исчезнувшими организмами. Среди 33 других семейств рептилий, которые населяли Северную Америку в позднемеловой период, известны следующие потери: вымерли все четыре семейства морских черепах (хотя представители трех семейств из четырех кое-где сохранились); исчезло одно из трех семейств крокодилов, *Goniophoridae*; вымерли два семейства птерозавров (летающие рептилии) — *Ornithocheiridae*

и одно семейство, еще не названное; два семейства иктиозавров (морские рептилии) — *Platypterygiidae* и другое семейство, без названия; все три семейства плезиозавров (также морские рептилии) — *Elasmosauridae*, *Policotylidae* и *Cimoliasauridae*; вымерли два из восьми семейств ящеров — *Poliglyphanodontidae* (примитивные чешуйчатые наземные формы) и *Mosasaunidae* (крупные морские формы).

Что произошло? Каким было это вымирание — постепенным или катастрофическим? Мой личный интерес касается непосредственно крупных рептилий мезозоя в Северной Америке, и круг вопросов, поднятых здесь, концентрируется в основном на исчезновении этих животных. Множество выдвинутых гипотез, объясняющих их исчезновение, предполагает следующие причины: разрушение цепи питания как в море, так и на суше, общая смена обстановки в связи с тем, что уровень моря начал падать в конце мезозоя, резкое поднятие температуры, падение температуры, вызванное вулканическим пеплом в атмосфере и т. д. Ни одно из этих явлений само по себе не может считаться убедительной причиной вымирания рептилий.

**В** 1979 г. палеонтологи, интересующиеся этой проблемой, получили новые данные. Группой сотрудников Калифорнийского университета в Беркли — геолог У. Альварес, его отец физик Л. Альварес и два химика Ф. Азаро и Е. Мишель — объявила об открытии аномально больших содержаний тяжелого элемента иридия в морской формации близ Губбио в Апеннинах в Италии. Иридий сконцентрирован в слое глины мощностью от 1 до 2 см, который отделяет морские известняки позднемелового возраста от покрывающих их морских известняков раннепалеоценового возраста. Известняки под глинами содержат ископаемые морские организмы, типичные для самой поздней части мела. В глинах организмы

полностью отсутствуют. В известняках над глинами меловые организмы также не встречаются, но присутствуют другие организмы, типичные для палеоцена.

Иридий — один из элементов, которые геологи называют сидерофильными, «любящими железо». Он редко присутствует в породах земной коры, но сравнительно обилен в метеоритах. Постоянный дождь микрометеоритов на поверхность Земли (более 70% их падает в океан) дает в результате умеренную концентрацию иридия и других звездных элементов в осадках, накапливающихся в океанических бассейнах.

В 1977 г. У. Альварес работал в составе международной группы ученых, включавшей палеонтолога И. Сильва из Миланского университета, которая изучала морские отложения близ Губбио, содержавшие слой глины. Поскольку выпадение микрометеоритного материала более или менее постоянно, Л. Альварес предположил, что, измеряя количество иридия в глинах, можно вычислить продолжительность отрезка времени, в течение которого накапливался слой. Ф. Азаро и Е. Мишель, к своему удивлению, обнаружили, что иридия в слое глины в 30 раз больше, чем в глинах из соседних слоев известняка.

Если бы этот избыток был связан с наземными источниками сноса, должно было бы обнаружиться увеличение содержания и других элементов в соответствии с составом минералов, слагающих глины. Анализ, произведенный группой из Беркли, обнаружил картину увеличения, близкую к характеру распределения элементов в метеоритах. Мог ли избыток иридия поступить из той части элементов океанического резервуара, которая имела микрометеоритное происхождение, и вдруг выпасть в осадок под влиянием определенных химических событий? Очевидно, нет. Ни выше, ни ниже слоя глины нет доказательств того, что обычная скорость накопления звездных элементов нарушилась, как это было бы, если бы произошло выпадение осадка.

**СЛОЙ ГЛИНЫ** мощностью 2 см. Он разделяет два слоя морских известняков, обнажающихся близ Губбио в Апеннинах, Италия. Белый известняк под глинами позднемезозойского возраста, серовато-розовый известняк над ними — раннекайнозойского. Анализ глины показывает, что они содержат в 30 раз больше иридия, чем глины из прилегающих морских слоев. Это привело геолога У. Альвареса, его отца, физика Л. Альвареса, и двух химиков, Ф. Азаро и Е. Мишель (все из Калифорнийского университета в Беркли), к предположению, что излишек иридия принесен внеземным телом, возможно, метеоритом размером с астероид, который столкнулся с Землей в конце мезозоя. Эта группа исследователей выдвинула гипотезу о том, что столкновение стало причиной многих вымираний морских и наземных организмов в то время. Для масштаба положена монета размером с монету в 25 центов.





**ВЫВЕТРЕЛЫЕ ОСАДКИ** позднего мела в районе водохранилища Форт-Пек, шт. Монтана (мощность 100 м). Осадки накапливались на прибрежной равнине близ берега большого внутреннего моря, которое здесь было в мезозое. Слева от человека на переднем плане частично обнаженный выветриванием череп динозавра *Triceratops*. Последние определяемые скелетные остатки динозавров найдены на этом уровне, в верхней части формации. Фи-

гура человека на заднем плане находится в вертикальной канаве, которая прорезана в тонком темном слое. Вторая канава, слева, пересекает тот же слой. На этом уровне, в 5,5 м выше черепа *Triceratops*, ископаемые споры и пыльца свидетельствуют о том, что растения вдруг стали скудными. Таким образом, вымирания растений и рептилий близки во времени, но не одновременны.



**ТРЕТЬЕ ОБНАЖЕНИЕ** континентальных осадков на границе между поздним мезозоем и ранним кайнозоем близ Экс-ан-

Прованс, Франция. Граница хорошо видна в центре снимка, рядом с фигурой человека.

Подобный избыток иридия был обнаружен Ч. Ортом и его коллегами из Научной лаборатории в Лос-Аламосе в верхней части меловых осадков континентального происхождения — такая аномалия, естественно, не может быть результатом выпадения в осадок из океанического резервуара. Эти данные были опубликованы в 1980 г. В сообщении высказывалось предположение, что во время массового вымирания некоторых морских микроорганизмов (а также во время исчезновения многих рептилий) на поверхности Земли внезапно отложилось 500 млрд. т «лишнего» внеземного материала. К этому времени группой из Беркли было установлено, что избыток иридия кроме отложений Губбио содержат также позднемеловые морские отложения в Дании, Испании и Новой Зеландии. (Позже этот список был дополнен данными об аномалиях содержания иридия в донных осадках Атлантического и Тихого океанов, полученных по материалам глубоководного бурения.)

Откуда мог поступать этот материал? Вопрос имеет самое прямое отношение к дальнейшей разработке гипотезы группы из Беркли. Если привнос происходил из Солнечной системы, механизм доставки материала на Землю, очевидно, можно было бы определить, так как для этой области пространства накоплено достаточно большое количество данных. Если же источник находился вне Солнечной системы, то, поскольку об огромных областях пространства имеется относительно немного сведений, поиск этого механизма неизбежно вызвал бы много спекулятивных гипотез.

**РАССМОТРИМ** возможность образования внеземного материала вне Солнечной системы в результате мощного взрыва сверхновой звезды. В поддержку этой гипотезы М. Рудерман из Колумбийского университета и Дж. Трарен из Иллинойского университета в Эрбана-Чемпин высказали предположение, что гигантский поток гамма-лучей от такого взрыва мог слугить метеоритный материал с поверхности Луны и Земля могла бы собрать его на своей поверхности. Однако впоследствии они подчеркивали, что потоки гамма-лучей от остатков сверхновых наблюдаются до сих пор и, кроме того, таким способом иридия к Земле могло быть перенесено меньше, чем требуется по гипотезе.

Потенциальную поддержку гипотезы сверхновых представляют исследования П. Маффея из Астрофизической обсерватории Катании в Италии. Он оценивает свидетельства в пользу мощного взрыва сверхновой, произошедшего на расстоянии около 1000 световых лет от Солнечной системы в конце мезозоя. Однако У. Такер из Астрофизического центра обсерватории Гарвардского колледжа и Смитсоновской астрофизической обсерватории считает эту гипотезу маловероятной. По его мнению, межзвездное вещество, приведенное в движение в результате даже очень мощной вспышки сверхновой, не могло бы накопиться в количестве достаточном, чтобы дать такие концентрации иридия в зоне сидерофильного обогащения в кровле позднемезозойских слюев, какие реально наблюдаются.

Цепь событий при взрыве сверхновой начинается с катастрофического сжатия

под действием сил гравитации. В ходе этого сжатия ядра тяжелых элементов в ядре звезды быстро захватывают нейтроны. Среди новых видов ядер образуется плутоний 244. В результате последующего взрыва этот радиоактивный изотоп выбрасывается в огромный объем пространства. Химики группы из Беркли исследовали содержание Pu-244 в глинах, богатых иридием, рассуждая, что если иридий образовался в сверхновой, то плутоний также будет присутствовать в определенных количествах, но он не был обнаружен. Далее они рассуждали, что два изотопа иридия Ir-191 и Ir-193 должны были образоваться в разных соотношениях при взрывах различных сверхновых. Ведь поток нейтронов, так же как и продолжительность взрыва, меняется от одной сверхновой к другой. При анализе обогащенных иридием глин было найдено, что изотопы иридия представлены в них не в каких-либо экзотических отношениях, а в пропорциях, типичных для иридия в Солнечной системе. Обычны также соотношения двух изотопов осмия, что было обнаружено в результате исследований в двух разных лабораториях: И. Эртожан из Лувенского университета (Бельгия) и Р. Ганалати из Химической компании Дж. Бейкера в Филиппсберге, шт. Нью-Джерси. Следовательно, вряд ли возможно, что внеземной материал, присутствующий в слое глины, был продуктом взрыва сверхновой звезды (иной, чем та, которая привела к образованию Солнечной системы).

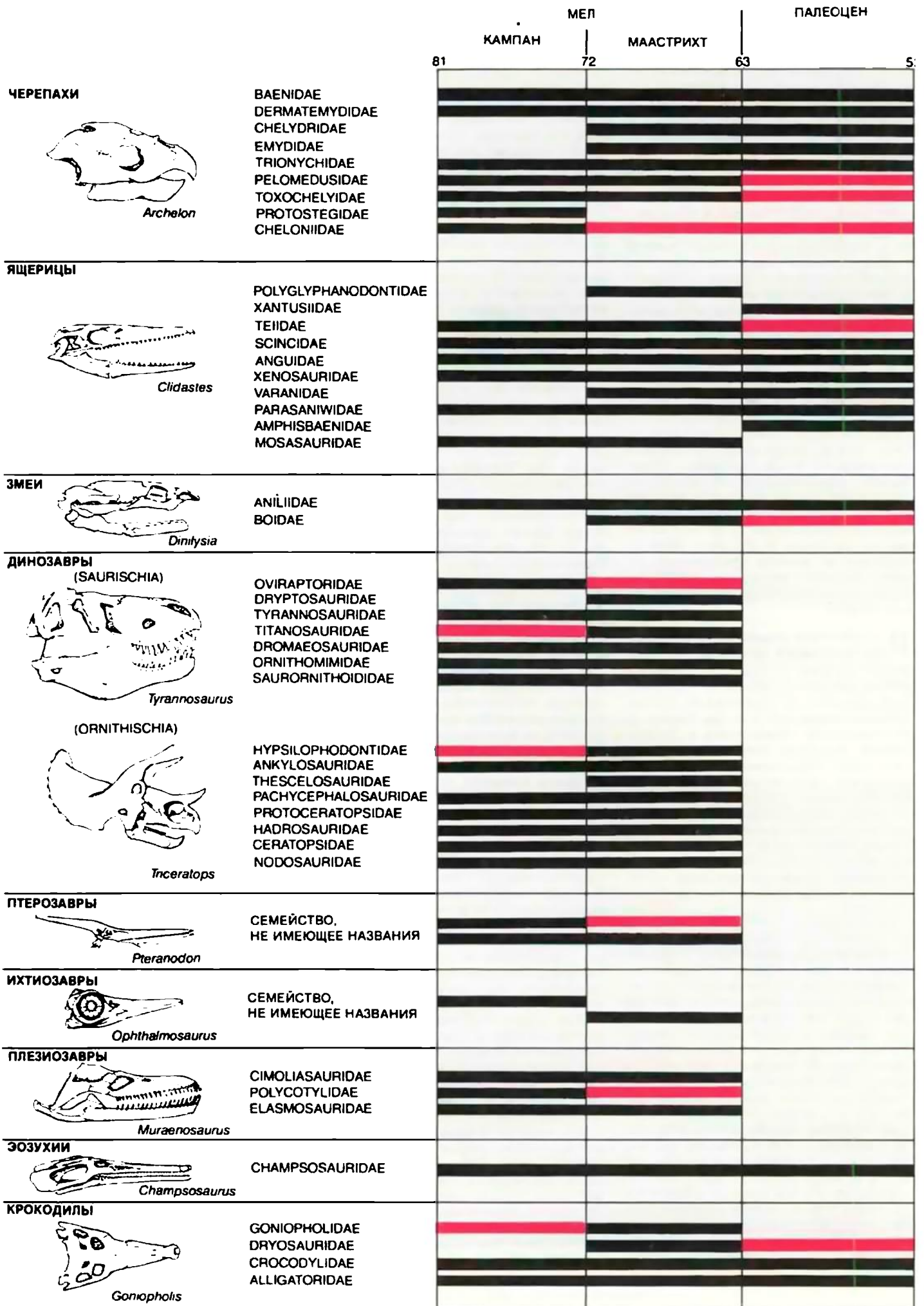
**ЕСЛИ** материал поступал из Солнечной системы, то как он достиг поверхности Земли? Предполагаются два пути: столкновение с метеоритом размером с астероид или столкновение с кометой. Что касается первой возможности, в группе из Беркли было подсчитано, что то количество экзотического материала, которое находится сейчас в слое, обогащенном иридием, во всем мире, могло содержаться в астероиде размером около 10 км в диаметре. Таким образом, в гипотезе об астероиде возникает трудноразрешимый вопрос о количестве материала земного происхождения в обогащенном иридием слое — оно недостаточно по сравнению с тем, какое должно было высвободиться из земной коры при столкновении с телом такого размера. Р. Грив из Департамента энергии, горного дела и ресурсов Канады предполагает, что возможно следующее объяснение: после удара иридий мог выпадать на поверхность Земли в виде осадков относительно чистого метеоритного материала, который повторно попадал в стратосферу под действием столкновения. Группа из Беркли, а также Я. Смит из Амстердамского университета (геолог, который изучил позднемезозойские слои известняков в Испании) видят другой путь к решению этой проблемы. Если астероид упал в море, что статистически возможно, количество материала коры, вызванное ударом, было незначительным.

Что касается возможности столкновения с кометой, следует напомнить, что кометы являются телами с низкой плотностью и состоят в основном из замерзшей воды. Подсчитано, что комета, содержащая сидерофильный материал в количестве достаточном, чтобы обеспечить наблюдаемое обогащение, должна была бы иметь массу вдвое больше, чем у гипотетического астероида.

Это, конечно, снова поднимает проблему экскавации. Ф. Кит из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и его коллеги Ц. Цу и Дж. Уоссон предположили, что гипотетическая комета, приближаясь к Земле, была разрушена гравитационными сила-



**ФОРАМИНИФЕРЫ** позднего мезозоя и очень раннего кайнозоя (изображение получено под сканирующим электронным микроскопом, увеличение 200). Представители *Globigerinacea* (сверху вниз): *Eoglobigerina* — раннепалеоценовый вид из Дании; экземпляр *Eoglobigerina* очень раннепалеоценового возраста из северной части Тихого океана (образец получен из керна глубоководной скважины); ветральный экземпляр *Rugoglobigerina*, поздний мел (из нефтяной скважины в Ливии). Второй экземпляр необычно малого размера был выбран, чтобы показать стадию постепенного восстановления после стресса среды, который обусловил вымирание большинства позднемезозойских фораминифер.



ми и поверхности достигли уже только ее осколки, поэтому не возникли ни один большой кратер, ни множественные мелкие кратеры.

Одно из этих гипотетических событий могло вызвать чрезвычайный, кратковременный стресс в биосфере. Например, С. Клубе и У. Напьер из Королевской обсерватории в Эдинбурге подсчитали, что ударная волна от взрыва на Земле крупного астероида уничтожила бы не только все леса, но и всех крупных наземных животных. А если бы взрыв произошел в море, он вызвал бы катастрофические волны высотой 8 км.

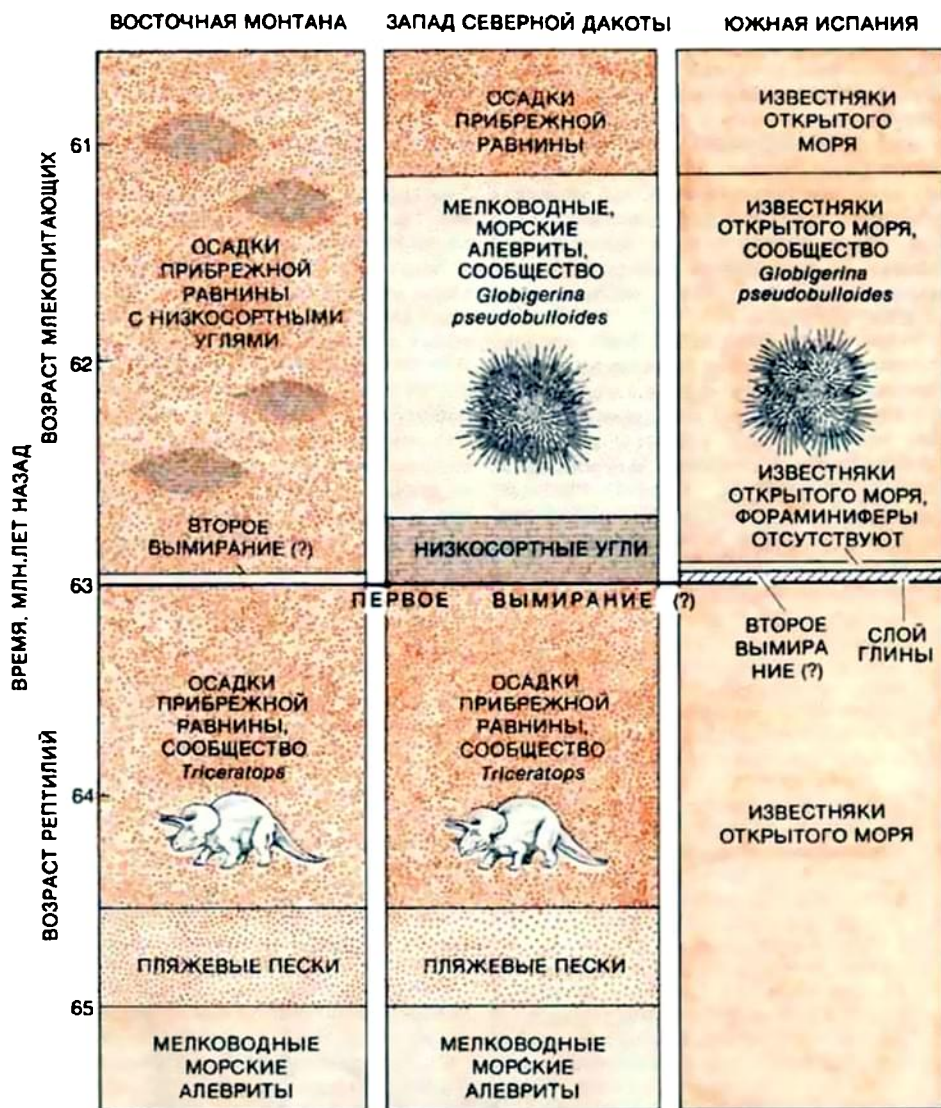
Чрезвычайные стрессы, такие, как эти, по мнению У. Альвареса и других членов его группы, не могли быть достаточными, чтобы вызвать позднемезозойское вымирание. Предполагается, что взрыв поднял в стратосферу огромное количество пылевых частиц. Следуя этой гипотезе, У. Альварес полагает, что они сделали атмосферу значительно менее прозрачной и нанесли удар в самое основание биосферы путем уменьшения фотосинтеза.

Какие доказательства в пользу этой новой гипотезы можно почерпнуть в ископаемой летописи? Весьма серьезные, но следует помнить, что ископаемая летопись содержит ограниченное количество информации и нелегко интерпретируется. Например, хотя палеонтологи начали собирать остатки мезозойских животных более ста лет назад, общее число найденных остатков скелетов динозавров составляет всего около 5 тысяч. Это в значительной степени объясняется жонглической стороной дела — сборище коллекций костей динозавров требует больших затрат. Для сравнения приведем такой пример. Много полезной информации об окружающей среде можно получить при изучении пыльцы мезозойских растений. Извлечь 20 тысяч зерен пыльцы и приготовить их для микроскопического исследования стоит около 500 долл. (включая недельное рабочее время). Собирать и препарировать такое же число костей динозавров стоит около 400 млн. долл. (включая миллион недель рабочего времени).

Важная роль в деле изучения биологических вымираний принадлежит такому фактору, как размер образца. Например, одно из самых последних сообществ мезозойских динозавров, остатки животных, которые странствовали по внутренним равнинам США и Канады 63 млн. лет назад, включало крупных рогатых травоядных, таких, как род *Triceratops*, и гигантских плотоядных, в частности рода *Tyrannosaurus*. Слои на 12 млн. лет древнее в Парке динозавров в пров. Альберта содержат значительно большее разнообразие динозавров, чем более молодые породы.

Означает ли это, как некоторые утверждают, что разнообразие динозавров уменьшалось с приближением конца мезозоя. Началось ли уже вымирание за миллионы лет до гипотетической катастрофы? Вовсе нет. Ископаемые Альберты

**ВЫМИРАНИЕ РЕПТИЛИЙ** в позднем меловом периоде. Из представленных 48 семейств 24 частично вымерли в конце последнего века мелового периода, в маастрихте, около 63 млн. лет назад. Цветное продолжение черной полосы в мелу обозначает данные о семействе в районах Северной Америки севернее Рио-Гранде. Цветная полоса в колонке палеоцена указывает выживание семейства вне Северной Америки. Кроме черепа змеи, все изображенные черепа принадлежат представителям вымерших видов. Динозавры были истреблены, и едва ли какой-нибудь отряд рептилий остался невредимым.



**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ** в двух районах суши Северной Америки и на территории моря в Испании в конце мезозоя и в начале кайнозоя. Одновременное исчезновение в кайнозое фораминифер *Globigerina pseudobulloides* в Северной Дакоте и в Испании подтверждает совпадение вымираний в море и на суше.

весьма разнообразны, там было собрано более 300 видов, а в более молодых районах менее 75 и даже 6 или 7.

В Европе разнообразие видов динозавров к концу мезозоя оставалось неизменным, а в Монголии оно фактически даже возросло. На других территориях земного шара слишком мало собрано образцов, чтобы выявить тенденции. Итак, веских доказательств продолжительности периода уменьшения разнообразия видов динозавров перед вымиранием нет.

**НИГДЕ** более в мире ископаемая летопись наземных организмов последних 1750 тыс. лет мелового периода не зафиксирована так полно, как в обнажениях

серовато-коричневых отложений 100-метровой мощности по южному краю водохранилища Форт-Пек в северо-восточной части шт. Монтана. В нижней половине формации преобладают речные пески, в верхней, более поздней, половине — аллювиальные алевролиты и глины. Смена характера отложений, вероятно, отражает изменения условий среды, которые вызвали изменение в распространении животных, в том числе динозавров, населявших эту прежде прибрежную равнину. На более низких уровнях преобладали крупные хищники рода *Tyrannosaurus* и травоядный утконос рода *Amatosaurus*. На верхних уровнях более обильны травоядные рода *Triceratops* и маленький, питающийся листьями динозавр рода *Thescelosaurus*. Р. Чади из Геологической службы США при изучении ископаемых спор и пыльцы были установлены подобные изменения и в растительном сообществе.

Несобычный характер изменений обнаружен в верхней части 100-метровой формации. Здесь в одном горизонте соотношенно, характерное для нижней части раз-

реза, меняется на обратное — количество остатков крупных динозавров местами больше, чем остатков мелких форм. Крупные животные обычно имеют более низкую рождаемость и смертность, чем мелкие. Следовательно, несоответствие такого рода (лучшая сохранность крупных ископаемых динозавров, чем мелких) позволяет предполагать массовую гибель. (Моя интерпретация экспериментальная, но дальнейшая работа близ водохранилища Форт-Пек, несомненно, прояснит ситуацию.)

Выше этого горизонта, близ кровли формации, отложения становятся более полосчатыми. Здесь найдены только кости динозавров в виде нескольких обломков, которые были вымыты из более древних слоев и вторично захоронены в речных отложениях. Соответственных изменений в растительном сообществе здесь не отмечается. Затем примерно в 5 м

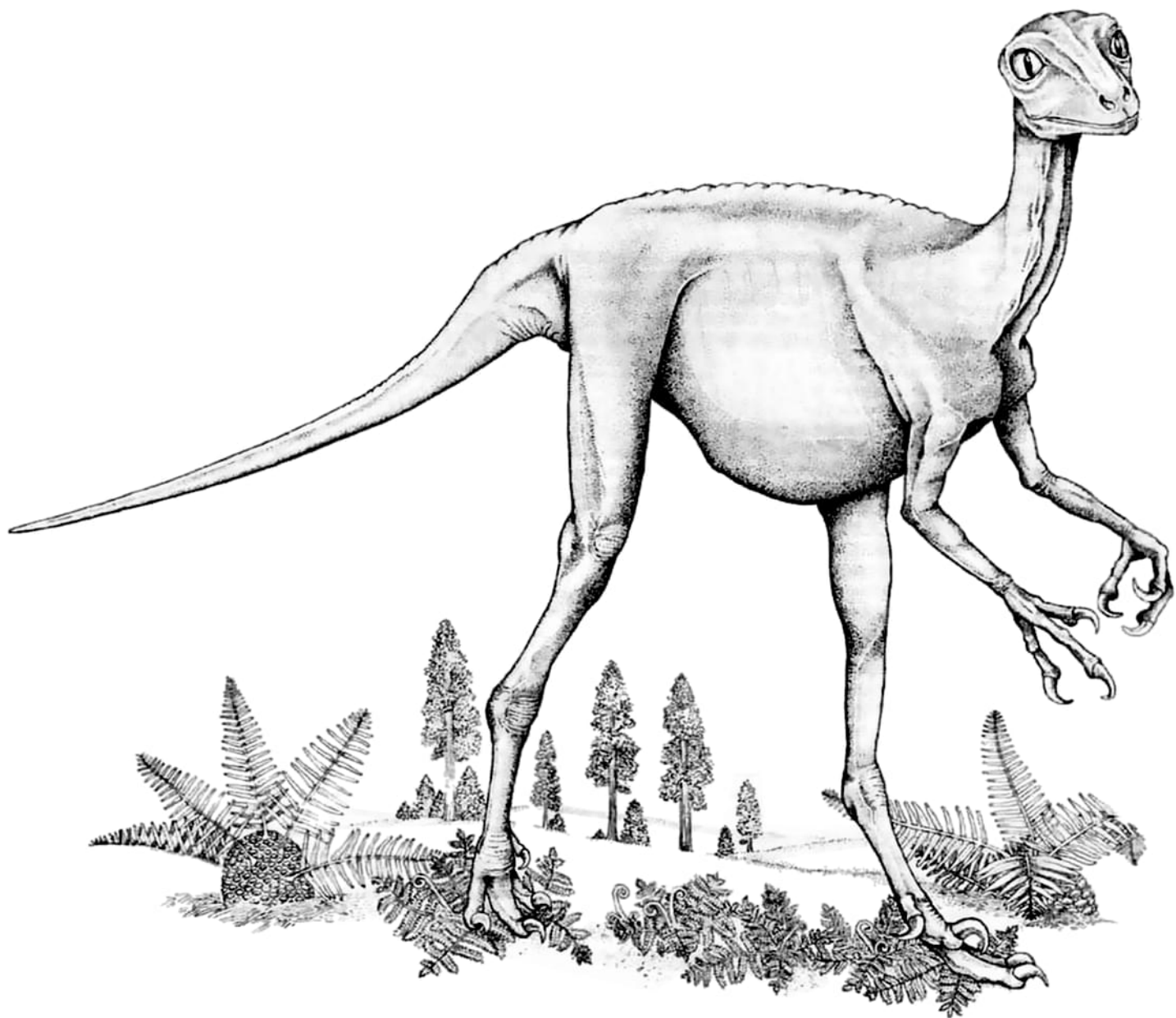
выше горизонта, в котором встречены последние непереложенные остатки скелетов динозавров, появляются в небольшом количестве ископаемые споры и пыльца. Д. Джарзен из Национального музея естественных наук в Оттаве изучил данные по растениям. Он и я установили, что 5-метровый интервал отложений соответствует промежутку времени в несколько десятков тысячелетий.

Выше этого слоя наблюдается чередование слоев низкосортных углей и слоистых алевролитов. Этот раздел между самыми поздними слоями, где встречаются динозавры, и самыми ранними, где появляется уголь, впервые несколько лет назад наблюдал У. Клеменс из Калифорнийского университета в Беркли. Чади, который изучил споры и пыльцу в угленосных слоях, сообщил, что здесь остатки растительности составляют всего лишь треть от того обилия, которое наблюдается ниже, в

слоях, содержащих кости динозавров. Начался век млекопитающих.

**В ИЗВЕСТНЯКЯХ**, изученных Смитом и Вего коллегами в Испании, обнаружены следы серии событий. Эти известняки отлагались на дне открытого тропического моря, которое вторглось в южную Испанию в позднем мезозое. Формации сложены почти целиком кальцево-карбонатными раковинами и обломками мелких фораминифер (представители свободнолежащих простейших морского зоопланктона). Здесь в течение более чем 10 млн. лет продуктивность планктона оставалась высокой и не наблюдается значительных изменений в характере органических обломков, отложенных на морском дне.

Затем внутри слоя мощностью не более 5 мм (представляющего менее чем двухсотлетние отложения) около 90% видов



**КРУПНОГОЛОВЫЙ ДИНОЗАВР *Stenonychosaurus inequalis***, поздний мел. Длина (включая хвост) около 3 м. Рисунок с реконструкции, выполненной в Национальном музее естественных наук в

Оттаве. Отношение веса мозга к весу тела такое же, как у ранних млекопитающих. Если бы такие хищники выжили, они могли бы помешать развитию млекопитающих.



фораминифер, встречающихся в формации ниже, просто исчезло. А те простейшие, которые продолжали существовать, уменьшились в размере в десять раз по сравнению со своими предшественниками. Так как поток раковин и обломков почти прекратился, прекратилась и роющая активность беспозвоночных животных, обитавших на дне. Покров из полосчатых красных и зеленых глин, образовавшийся на морском дне, достиг мощности около 10 см. Условия оставались относительно стабильными в течение почти 20 тысяч лет; вымер только один из сохранившихся видов фораминифер. Затем жизнь опять начала развиваться. Возобновилось осадконакопление, и дно океана снова было заселено придонными беспозвоночными. Появилось новое сообщество фораминифер и скоро сменилось другим, в котором уже встречается такой современный вид, как *Globigerina pseudobulloides*. Возродившиеся простейшие обитали в древнем испанском море в течение следующих двух миллионов лет.

На другом краю света, там где теперь находится Северная Дакота, в то же самое время большое внутреннее море распространилось на запад, затопив площадь дельты и захоронив остатки *Triceratops*, которые затем были перекрыты угленосными слоями. Морские алевриты, которые были отложены в верхней части угленосной толщи, содержат раковины видов фораминифер, принадлежащих к тому же сообществу *G. pseudobulloides*, которое появилось в море Испании после крупного вымирания фораминифер. Если принять во внимание те неопределенности, которые существуют в оценке времени накопления отложений по их мощности, то вполне вероятно, что события, о которых рассказывают осадки, здесь, близ водохранилища Форт-Пек, и в Южной Испании идентичны. Если это так, то вымирание динозавров на суше и фораминифер в море произошло в одно и то же время.

**Ф**ОРАМИНИФЕРЫ не были единственными морскими организмами, исчезнувшими в конце мезозоя. Как я отметил выше, вымерли также некоторые морские рептилии. Так было и с различными моллюсками: цефалоподами со спирально свернутыми раковинами, известными как аммониты, головоногими моллюсками, белемнитами, и своеобразными кораллоподобными двусторонними, известными под названием рудистов. Большая часть основных семейств морских животных продолжала существовать, но они потеряли много родов и видов.

Ископаемая летопись на этой критической границе еще недостаточно хорошо изучена, особенно это касается крупных морских животных и такой микрофауны, как фораминиферы. Причина в том, что более крупные животные многочисленны и разнообразны, а число палеонтологов ограничено. Например, даже в такой относительной хорошо изученной формации, как слон пещерного мела в Дании, до сих пор не определена степень выживания таких важных групп животных, как губки, брахиоподы, морские улитки и ракообразные. Другой пример: летопись жизни животных этого периода в тропических районах земного шара еще плохо известна. Так как фактов накоплено пока явно недостаточно, неудивительно, что между градуалистами и катастрофистами продол-

жаются горячие дебаты.

Составление предварительных таблиц помогает получить представление о масштабах вымирания. Сравним число родов животных в ископаемой летописи примерно за последние 10 млн. лет мелового периода с числом родов в ископаемой летописи за такой же отрезок времени после кризиса. Общеизвестно, как ненадежны такие числовые показатели. Тем не менее цифры показывают на уменьшение разнообразия родов на земном шаре на 50%. Когда кто-то повторяет эту числовую игру, подсчитывая число известных видов растений и животных до кризиса и после него, результат получается таким же. В выборке, которая включает в себя млекопитающих как представителей наземных животных, хитиновые морские водоросли как представителей растений и плоских морских ежей, морских звезд и устриц как представителей морских животных, уменьшение количества видов в одном роде за период вымирания составляет в среднем от полутора до трех видов. Поэтому кажется разумным предположить, что биологический кризис, сочетавшийся с вымиранием динозавров, стал также причиной исчезновения 75% прежнего количества видов растений и животных. В действительности эта оценка, вероятно, несколько занижена.

Летопись вымирания показывает некоторые аномалии. Например, ни одно из выживших наземных животных не весило более 25 кг, но многие из тех, которые вымерли, были значительно меньше. Наземные растения в северных районах умеренной зоны исчезли в больших количествах, чем в южных. Однако растения и животные холодноводных сообществ были едва затронуты. По мнению А. Кларка из Матталойсетта, шт. Массачусетс, много похожего происходило и с глубоководными морскими моллюсками. Мелководная морская жизнь, особенно фауна тропических рифов, изменилась более глубоко.

Даже на животных, которые обитали на одних и тех же пространствах, воздействие не было идентичным. Как отметил Э. Буффето из Парижского университета, крокодилы, занимавшие морское мелководье, пережили период вымирания, а млекопитающие, жившие в той же среде обитания, исчезли. Где бы ни действовали агенты биологического стресса, включая нарушения в цепи питания, способность биосферы противостоять этому была, очевидно, разной.

Какой смысл имеет то, что в конце мезозойской эры вымирали и животные и растения? Действительно ли они были отделены одно от другого — сначала вымерли наземные животные, а затем растения? Если это так, то было ли второе вымирание результатом стрессов, таких же тяжелых, как те, что вызвали первое, или это было просто квазинаследственное явление в биологии? Каким бы ни был ответ на этот вопрос, человечество должно оценить длительное благоприятное для него влияние катастрофы. К концу мезозоя у некоторых мелких плотоядных динозавров отношение веса мозга к весу тела достигло такого размера, какое характерно для ранних млекопитающих. Если эти предположительно более разумные пресмыкающиеся продолжали бы существовать, то их потомки, возможно, могли бы первыми занять наше положение самых разумных животных на планете.

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

**ФИЗИКА  
ЗА РУБЕЖОМ. 1982**

Сборник статей

Перевод с английского

Сборник «Физика за рубежом. 1982» открывает новую серию ежегодников, предназначенных для широких кругов читателей, имеющих физическое образование (включая студентов-физиков), но не являющихся специалистами по соответствующим вопросам. Первый сборник содержит статьи из научно-популярного журнала «Физикс тудей», издаваемого Американским физическим обществом и сочетающие популярность изложения с высоким научным уровнем излагаемого материала.

Две статьи сборника («Наука о низких температурах — осталось ли в ней что-нибудь интересное для физика?» и «Чистая физика — дорогостоящая жизнеспособность и ограниченная престижность»), написанные соответственно Р. Ричардсоном и Б. Пиппардом, имеют общий характер. Современное состояние вопроса о сверхпроводимости рассмотрено в статьях: «На пути к сверхпроводящим материалам» (Дж. Хульм, Дж. Кунцлер, Б. Маттас). «Органическая соль со свойствами сверхпроводника», «Сверхпроводящая электроника» (Д. Мак-Дональд). Взаимодействие лазерного излучения с веществом и молекулярная динамика освещаются в трех статьях: «Возможна ли лазерная селективная химия?» (А. Зейвал), «Динамика реакций с образованием молекул в заданных состояниях» (Р. Заре, Р. Бернштейн), «Исследования со скрещенными лазерными и молекулярными пучками» (Ю. Ли, И. Шен). Интересно написаны обзорные статьи: «Горячие электроны в слоистых полупроводниках» (К. Гесс, Н. Голонык) и «Баллистические тепловые импульсы в кристаллах» (Дж. Вулер).

Иллюстрации к статьям в виде таблиц, рисунков и графиков делают изложение материала не только понятным, но и наглядным.

1982 г., 220 страниц  
с иллюстрациями

Цена 60к.



# Регенерация растений картофеля из протопластов клеток листа

*При новом подходе в клонировании, или бесполом размножении, растений исходным материалом служат живые клетки, с которых удалили их наружную оболочку. Этим методом удается получать новые разновидности растений и повышать урожайность сельскохозяйственных культур*

**ДЖЕЙМС Ф. ШЕПАРД**

**У** РАСТЕНИЙ и животных различия между индивидуумами обычно поддерживаются комбинированием генов при половом размножении. Такие различия, несомненно, имеют адаптивную ценность; недаром так сложно устроены органы размножения цветковых растений, так разнообразны возникшие в ходе эволюции приспособления, облегчающие перекрестное опыление. Тем не менее не все цветковые растения размножаются исключительно половым способом. У некоторых видов развилась также способность к бесполому размножению, реализуемая тканями, анатомически отличными от частей цветка. Орган бесполого, или вегетативного, размножения такого растения — это подземный стебель, видоизмененный корень или просто лист, способные развиться в целое растение. Каково бы ни было происхождение вегетативной ткани, при бесполом размножении в потомстве, как правило, сохраняется фенотип, т.е. физические свойства родительского растения.

Индивидуальные организмы, возникающие в результате бесполого размножения из соматических клеток — клеток тела, — называются клонами, а способ размножения — клонированием. В этой статье я опишу новый экспериментальный подход к клонированию; как ни странно, он позволяет путем регенерации получать растения с полезными фенотипическими вариациями. Метод, который получил название «клонирование протопластов», был разработан для растений картофеля, но в принципе его можно применить для самых разных сельскохозяйственных культур. Дальнейшие исследования покажут, сыграет ли клонирование протопластов свою роль в улучшении культур. В последнее время проблема клонирования привлекает много внимания, поэтому прежде всего я объясню, в каком смысле я употребляю термин «клонирование».

**О** ЧЕНЬ часто считают, что клон — это точная копия родительского организма. На первый взгляд это верно. В природе клоны, полученные от одного и того же родителя, во многих случаях очень похожи друг на друга, и можно было бы ожидать, что они имеют функционально эквивалентные геномы. Однако это общепринятое представление является заблуждением.

Термин «клон» происходит от греческого *κλων*, что означает черенок или побег, пригодный для размножения растения. В 1903 году Г. Уэббер предложил пользоваться транслитерацией — словом

«*clon*» — для обозначения тех растений, которые размножаются вегетативным способом и, по его словам, являются «просто частями одного и того же индивидуума». Вскоре стали писать «*clone*», и теперь этим словом обозначают все формы жизни, размножающиеся бесполом путем. Термин «клон» применяют и в случае воспроизведения ДНК — генетического материала; говорят, несколько вольно, и о клонировании генов в бактериях.

В настоящее время большинство научных справочников определяет клон более строго как индивидуальный организм, возникший бесполом путем из единственной клетки в результате митоза, т.е. такого способа деления, при котором дочерние клетки получают столько же хромосом, сколько их в родительской клетке. (Митоз — это обычная форма деления соматических клеток, он отличается от мейоза, или полового деления, при котором дочерние клетки получают ровно половину родительского набора хромосом.) Это определение не подразумевает фенотипической или генетической гомогенности возникающей популяции; другими словами, клоны от одного и того же растения не обязательно должны быть идентичны внешне или иметь одинаковый генотип. Напротив, у некоторых видов клон может заметно отличаться от родительского организма; следовательно, в геноме клона, как и в геноме организма, размножающегося половым способом, должны быть какие-то механизмы, которые обеспечивают генетические вариации. Этот второй источник различий между индивидуумами значительно увеличил бы спектр разнообразия вариантов для селекции культур растений.

Некоторые виды сельскохозяйственных культур размножают вегетативно, чтобы сохранить основные черты разновидности. Так поступают, когда растения бесплодны при половом размножении, а также когда их геном слишком сложен для того, чтобы в потомстве при половом размножении сохранялся исходный фенотип. У таких видов клоны иногда отличаются от родительских растений. Такие отклоняющиеся от родительского типа организмы называют соматическими вариациями, почковыми спортами или просто спортами; они появляются в результате постоянно, но с низкой частотой происходящих генетических изменений в специализированных клетках меристемы — быстро делящихся клетках на кончике растущего стебля, ветви или корня, которые образуют целое новое растение или его часть. Многие важные разновидности вегетативно размножаемых сельскохо-

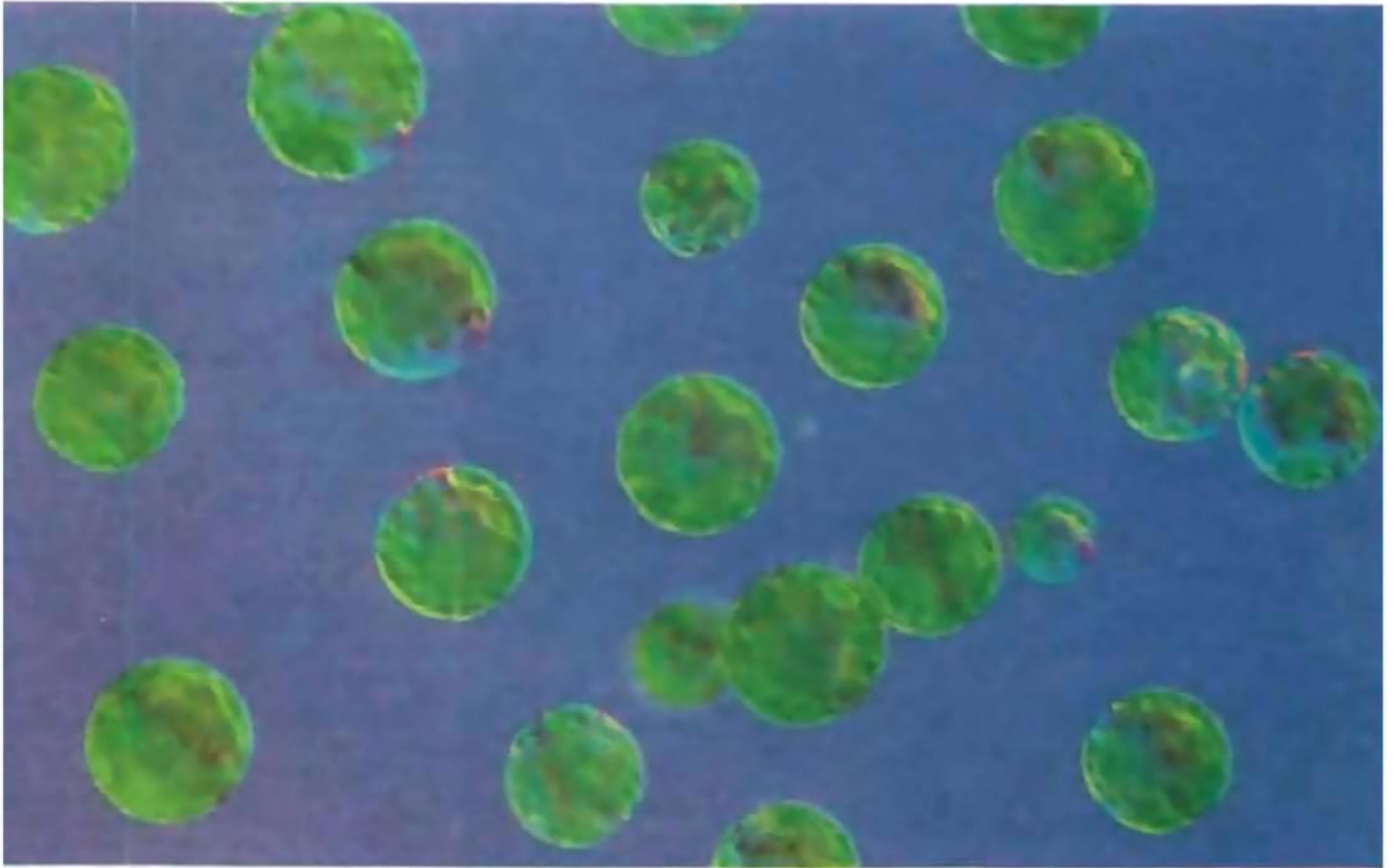
зяйственных растений возникли в результате таких соматических мутаций. Общеизвестные примеры — это розовый грейпфрут, навьель (апельсин с рубчиком), гладкий персик, некоторые разновидности картофеля. У других видов, например у батата, спорты появляются с очень высокой частотой, достигающей 2%; в таких случаях при обычном клонировании постоянно существует проблема, как поддерживать чистоту разновидностей.

**К** ПОЯВЛЕНИЮ спортов у растений могут приводить различные генетические механизмы. Возможны изменение числа хромосом в клеточном ядре, точковые мутации (при которых изменение происходит только в одном гене в одной из хромосом), а также изменения внеядерных генов (т.е. генов в клеточных оргanelлах — хлоропластах и митохондриях). Большинство соматических мутаций еще не охарактеризовано генетически, так что этот феномен, вполне вероятно, имеет и другие механизмы.

Глубже разобраться в природе соматических вариаций мешает тот факт, что у многих сельскохозяйственных растений геномы полиплоидны: каждое клеточное ядро у них содержит более двух наборов хромосом. В случае вегетативно размножаемых видов полиплоидия не препятствует высокой частоте соматических изменений, однако она сильно затрудняет генетический анализ, особенно если у растения сложный геном и проявление измененного признака контролируется многими генами.

В последние годы клонирование растений достигло такой степени развития, когда удается культивировать отдельную растительную клетку и побудить ее к регенерации целого растения. Способность одиночных клеток к развитию (исследователи биологии клетки называют ее тотипотентностью) впервые обнаружил примерно 25 лет назад Ф. Стьюарт (Корнеллский университет) в опытах по культивированию клеток моркови. К 1965 году тотипотентность установили в аналогичных культурах клеток и других видов растений, например табака, а впоследствии продемонстрировали для соматических и половых клеток многих растений.

Принципиальным успехом в этой области стала работа И. Такебе и его коллег (1971 г.). С помощью двух ферментов — пектиназы и целлюлазы — они разделили лист табака на живые, но лишённые стенки клетки (протопласты). Выделенные протопласты культивировали в среде, способствующей росту и делению клеток. На заключительной стадии



**ПРОТОПЛАСТЫ** клеток листа картофеля округляются после того, как отделяется окружающая их клеточная стенка. Протопласты интенсивно растут в культуральной среде, которая содержит все питательные вещества, необходимые им для образова-

ния новых клеточных стенок, для роста и деления. В каждом протопласте есть ядро и хлоропласты (хлоропласты — это клеточные органеллы, которые содержат хлорофилл, поэтому на фотографии они выглядят зелеными).



**ПОЛЕ ПРОТОКЛОНОВ**, полученных из протопластов растений картофеля Рассет Бэрбанка. Каждый ряд состоит из растений, которые выросли из клубней одного и того же растения, полученного в свою очередь из одного протопласта. Заметны вариации в

высоте растений и в числе цветков на них. Фотография сделана на исследовательской картофелеводческой ферме близ Гранд-Форкса, Северная Дакота.

эксперимента массы культивированных клеток (каллюсы) индушировали, и в результате они образовывали небольшие побеги, которые в конце концов вырастали в целые растения.

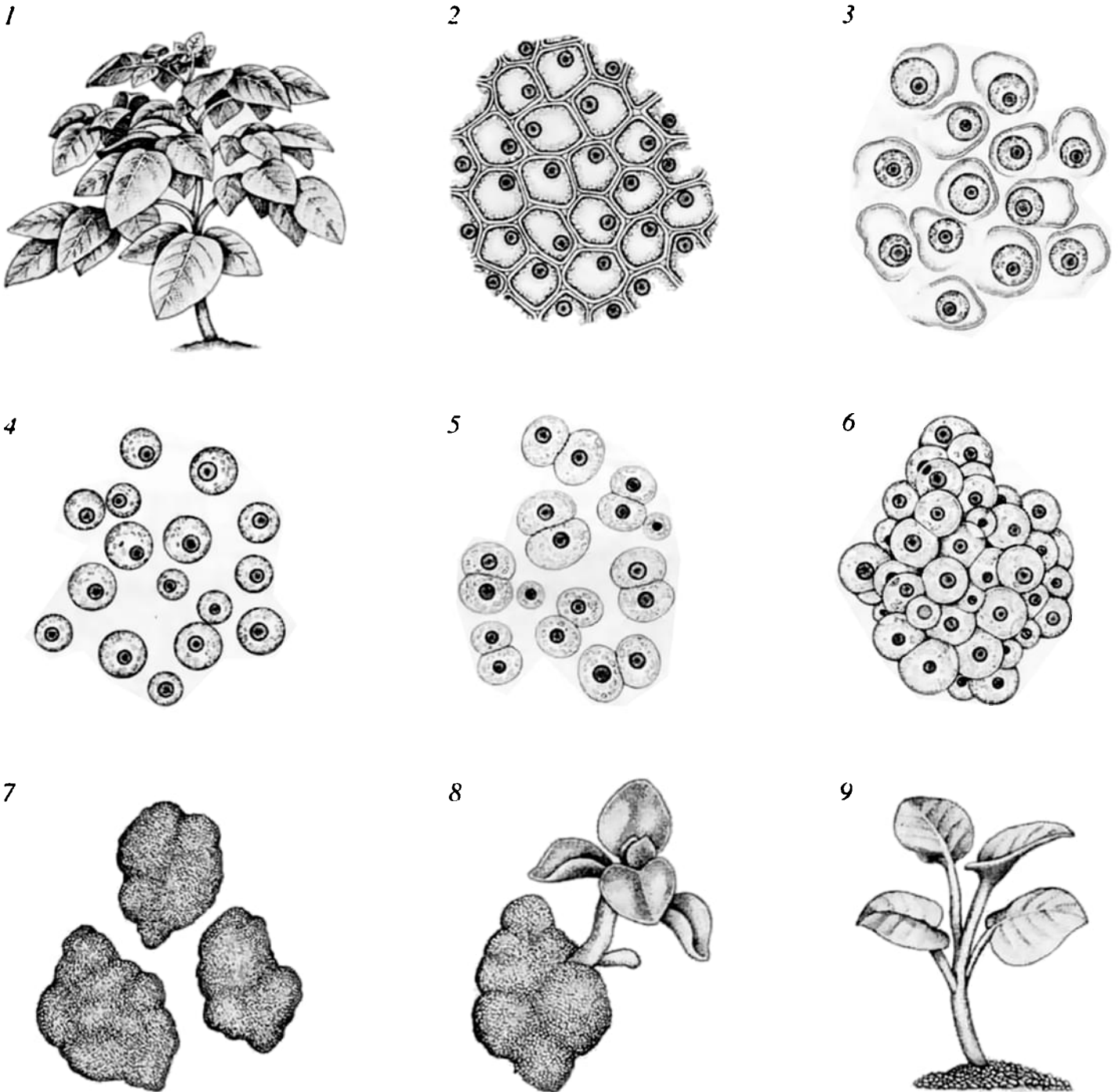
Особенно важно, что в этих опытах более 90% клонов, полученных из протопластов (протоклонов) были очень похожи на родительское растение как внешне, так и по набору хромосом. Ранее, когда растения табака регенерировали из протопластов клеток каллюсы, которые в течение длительного времени перед этим поддерживали в культуре, такого сходства обычно не наблюдалось. Напротив, многие

клоны были уродливыми, недоразвитыми, с серьезными хромосомными аномалиями. Протопласты листа табака могли служить источником генетически стабильных клеток, с которыми можно производить разнообразные эксперименты, не опасаясь предшествовавших или спонтанных генетических изменений.

Успех опытов с протопластами позволял предполагать, что, если бы удалось разработать подходящие процедуры для растений других видов (особенно заманчиво это было бы для сельскохозяйственных культур), их протоклоны также будут генетически однородными (конечно, в

том случае, если протопласты не подвергать мутагенным воздействиям или генетическим манипуляциям до их культивирования). Тщательные эксперименты подтвердили, что клоны из протопластов клеток листа некоторых других видов растений также однородны по внешнему виду и не обнаруживают частых соматических изменений.

В 1973 году мои коллеги и я начали работу с протопластами клеток листа табака. Вскоре мы обнаружили фенотипические различия внутри популяции клонов, полученных из протопластов. В от-



**МЕТОДИКА КЛОНИРОВАНИЯ**, примененная автором и его коллегами (Канзасский университет) для регенерации целого растения картофеля из протопластов клеток листа. Сначала берутся концевые листочки молодого растения картофеля (1). Листья помещают в раствор, содержащий ферменты, разрушающие клеточную стенку (2). В раствор добавляют вещество, заставляющее протопласты отделяться от клеточной стенки и округляться, изолируя таким образом протоплазму во время разрушения клеточных стенок (3). Протопласты отделяют и переносят в культуральную среду (4), где они растут, образуют новые клеточные стенки и на-

чинают делиться (5). Примерно через две недели каждый протопласт превращается в комочек недифференцированных клеток, называемый микрокаллюсом (6). Микрокаллюсы переносят в другую культуральную среду, где они вырастают в каллюсы нормального размера (7). На этой стадии клетки каллюса начинают дифференцироваться, образуя зародышевый побег (8). Перенесенный в третью питательную среду, побег развивается в небольшое растение с корнями, которое высаживают в почву (9). Ниже приводятся микрофотографии ключевых этапов.

существовании каких-либо мутагенных воздействий примерно у одного из 250 регенерировавших растений появлялась пестрая окраска листьев. При скрещивании измененный признак обычно передавался потомству только через материнские клетки. Такой характер наследования указывает на то, что мутации затронули внеядерный генетический материал.

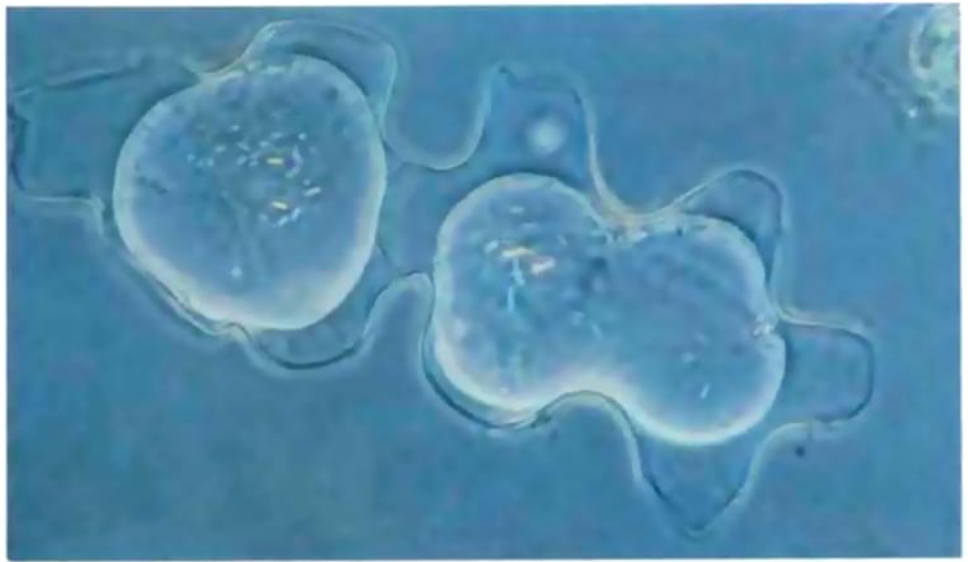
Эти данные означали, что не все протоклоны табака с нормальным числом хромосом идентичны. Хотелось думать, что, если подобную технику удастся разработать для какой-либо сельскохозяйственной культуры, которой свойственна высокая частота соматических мутаций, в результате получатся полезные генетические изменения. Чтобы проверить эту гипотезу, мы выбрали обычный коммерческий сорт картофеля Рассет Бёрбанка.

История сорта Рассет Бёрбанка восходит к 1875 году, когда ботаник Лютер Бёрбанк выбрал сеянец из потомства плода (ягоды) картофеля. Это растение вегетативно размножили клубнями (клубни — это хорошо всем знакомые съедобные части растения картофеля, которые представляют собой не корни, а видоизмененные подземные стебли); в результате многократного клонирования возникли разновидности картофеля, описанные Бёрбанком. В начале нашего столетия в линии Бёрбанка был отобран спорт с красно-коричневой кожурой на клубнях. Эту разновидность назвали Рассет Бёрбанка (russet — красновато-коричневый цвет); в США это сейчас самая распространенная разновидность картофеля, на ее долю приходится почти 40% общего сбора картофеля.

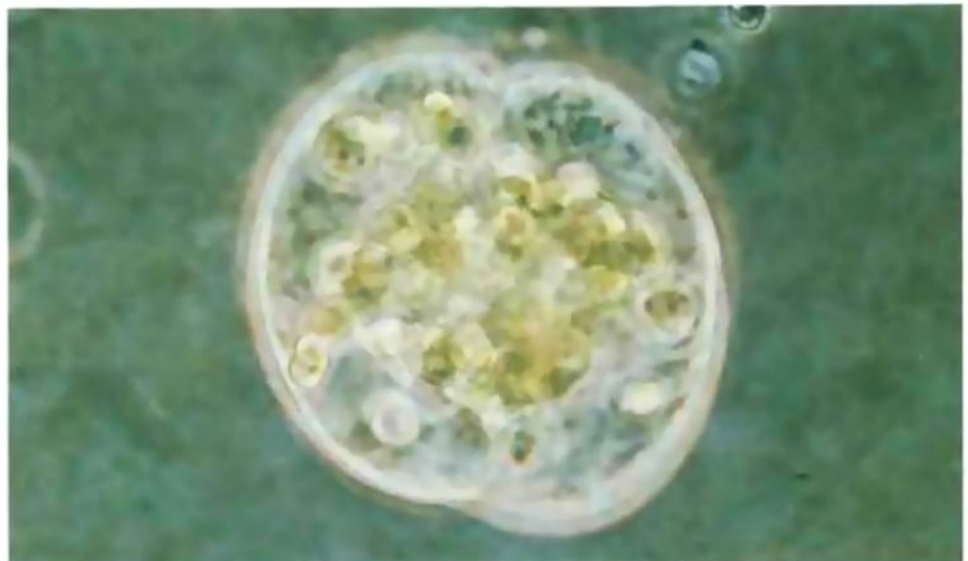
Достижение Бёрбанка, создавшего базу для новой культуры картофеля, исходя всего лишь из нескольких семян одного растения, особенно впечатляет, если вспомнить, что за последние 50 лет селекционеры растений в США исследовали более 20 млн. сеянцев картофеля, но не получили ни одного сорта, способного соперничать со спортом Рассет Бёрбанка. Разумно предполагать, что, отталкиваясь от здоровой генетической основы, с помощью вегетативного размножения можно вывести новые сорта культурных растений. Однако простой отбор встречающихся в норме спортов не эффективен, поскольку частота соматических изменений низка, и едва ли обнаружатся спонтанные улучшения, например, устойчивости к заболеваниям.

Мы решили подойти к делу с другой стороны и стали измерять частоту соматических вариаций в популяциях клонов, полученных из одиночных протопластов; хотелось выяснить, можно ли получить преимущества по сравнению с отбором спортов на уровне целых растений. Прежде всего необходимо было разработать методику выделения протопластов из клеток картофеля и регенерации из них целых растений. В 1977 году мы опубликовали описание успешных опытов, а впоследствии усовершенствовали методику и распространили ее на другие сорта картофеля.

**П**ЕРВЫЙ этап получения целого растения картофеля из протопластов клеток листа — ферментативное переваривание тканей листа с целью извлечь одиночные протопласты. До стадии одиночных протопластов процедура такая же, как при выделении протопластов из клеток листа других растений. Однако затем по-



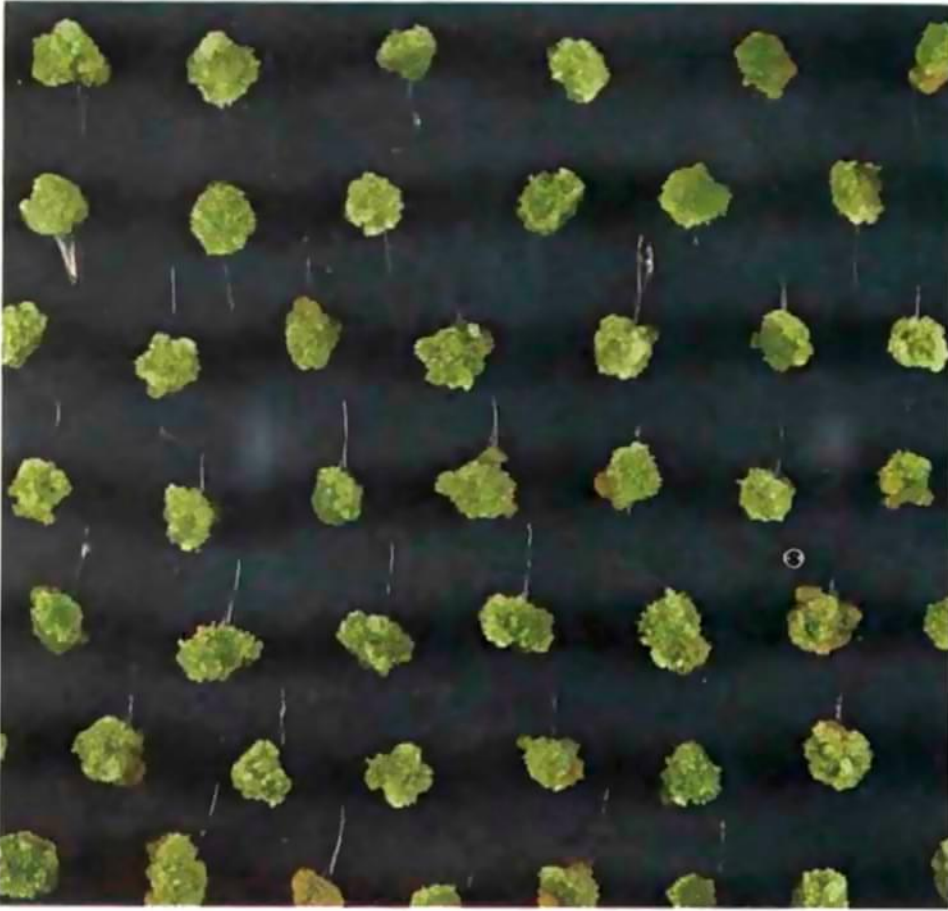
ОТДЕЛЕНИЕ ПРОТОПЛАСТОВ клеток листа от клеточной стенки. Под действием осмотически активного вещества клетки теряют воду, протоплазма сжимается ( $\times 1000$ ).



РАСТУЩИЙ ПРОТОПЛАСТ образовал новую клеточную стенку и находится в процессе первого клеточного деления. Микрофотография сделана на шестой день культивирования (фазовый контраст).



МИКРОКАЛЛИУС недифференцированных клеток, выращенных из одного протопласта клеток листа картофеля. Микрокаллиус окрашен флуоресцирующим красителем (акридиновым оранжевым) и снят при ультрафиолетовом освещении. Ядра клеток выглядят яркими желтыми пятнами.



**КАЛЛЮСЫ**, полученные из протопластов листа картофеля, через 4 недели после переноса во вторую питательную среду, индуцирующую образование побегов. На этой стадии каллюсы обычно становятся зелеными.



**ЗАРОДЫШЕВЫЙ ПОБЕГ** появляется из массы недифференцированных клеток через 6 недель инкубации в среде, индуцирующей образование побегов.

надобился ряд особых стадий культивирования, чтобы иницировать и поддерживать деление протопластов, а также направлять развитие каллюсов, возникающих в результате пролиферации потомства каждого из протопластов.

В подходящих условиях культивирования развившиеся из протопластов каллюсы растут в виде плотных ярко-зеленых образований. Затем клеточные массы, которые на этой стадии достигают 3 — 5 мм в диаметре, переносят в другую среду, которая стимулирует развитие побегов. В этой среде 10 — 40% каллюсов образуют зачаточные побеги. Наконец, каллюсы с побегами переносят на третью питательную среду, в ней побеги развиваются в целые растения со стеблями, листьями и корнями.

В отличие от растений, которые получали из протопластов табака, большинство растений картофеля, выросших из протопластов сорта Рассет Бербанка, не идентичны родительскому растению и друг другу. Между такими клонами картофеля есть много различий; для простоты можно разделить все протоклоны на два больших класса. В первый войдут aberrации — протоклоны с ярко выраженными структурными аномалиями и пониженной жизнеспособностью. В ядрах клеток этих протоклонов часто изменено число хромосом. Такие «уродцы» попадают во всех популяциях протоклонов картофеля Рассет Бербанка; их подробно не исследовали, и я не буду их далее рассматривать.

Протоклоны культуры Рассет Бербанка второго типа называют фенотипическими вариациями, подразумевая, что различия между индивидуумами незначительны и большинство характерных черт сорта сохранилось. Исследования показали, что в большинстве фенотипических вариаций исходный набор хромосом (48) сохраняется, хотя иногда число или состав хромосом или и то и другое вместе могут незначительно отличаться.

Одно из изменений класса фенотипических вариаций — измененная чувствительность к болезнетворным организмам. В 1978 году У. Матерн и Г. Стробел (Университет в Монтане) и я обнаружили, что несколько протоклонов культуры Рассет Бербанка по сравнению с родительской разновидностью менее восприимчивы к поражению грибом *Alternaria solani*, возбудителем ранней гнили картофеля. Большинство протоклонов не отличалось от родительского растения по реакции на патогенный грибок, некоторые поражались даже в большей степени, чем исходное растение. Протоклоны различались только по чувствительности к возбудителю, и выявить разницу можно было лишь после заражения их грибом. Во всех других отношениях протоклоны были очень похожи.

Растения картофеля болеют также фитофторозом, возбудителем которого является грибок *Phytophthora infestans*. Это заболевание в сороковые годы прошлого века вызвало «картофельный голод» и до сих пор остается главной опасностью при выращивании картофеля. С помощью обычных скрещиваний с дикорастущими родственными растениями в некоторые сорта картофеля удалось ввести гены устойчивости к этому грибу, однако сам возбудитель очень изменчив, и быстро возникают штаммы, которые преодолевают генетически обусловленную устой-

чивость. В некоторых случаях удавалось добиться длительной устойчивости против широкого спектра возбудителей с помощью объединения нескольких генов и формирования так называемой мультигенной устойчивости.

В 1980 г. Э. Шахин, Д. Бидней и я показали, что протоклоны сорта Рассет Бербанка различаются по устойчивости к возбудителю фитофтороза. Небольшие кусочки стеблей от каждого протоклона, а также от родительского растения заражались грибом. Около 2% протоконов оказались устойчивее к выбранному штамму *P. infestans*, чем растения сорта Рассет Бербанка на той же стадии развития. Более того, при размножении растений клубнями в потомстве устойчивых протоконов исходный уровень устойчивости к возбудителю сохранялся.

Протоклоны с повышенной устойчивостью к фитофторозу различались между собой по степени устойчивости. Однако ни один из них не обладал крайней ее формой, которая характеризуется локальной реакцией гиперчувствительности при заражении грибом. Эта форма устойчивости определяется основными доминантными генами устойчивости, которые есть у некоторых диких родичей картофеля. Вряд ли точковые мутации доминантных генов приводят к устойчивости, наблюдаемой у протоконов, если только устойчивость не обеспечивается особыми, отличными от известных, генами картофеля. Мутации в рецессивных генах, скорее всего, не проявляются вследствие тетраплоидности растений картофеля: каждая соматическая клетка содержит четыре набора хромосом, так что для проявления рецессивного гена необходимо, чтобы он имелся во всех четырех наборах, а это очень маловероятно. Необходимо подчеркнуть, однако, что оценка устойчивости протоконов к фитофторозу проводилась в лаборатории, а не в полевых условиях. Поэтому нельзя утверждать, что полученная устойчивость будет непременно полезна при выращивании картофеля.

Исследуя восприимчивость к некоторым заболеваниям, как описано выше, в популяциях протоконов можно довольно быстро выявлять стабильные фенотипические различия. Чтобы получить достоверные результаты о признаках другой группы, требуется количественный учет в течение нескольких лет. Речь идет о хорошо известных овощеводам сложных количественных признаках, которые определяются совместным действием многих генов.

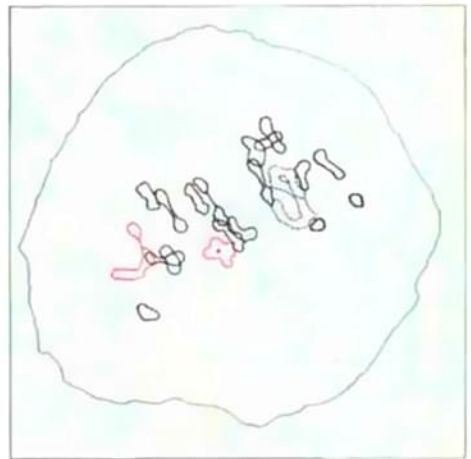
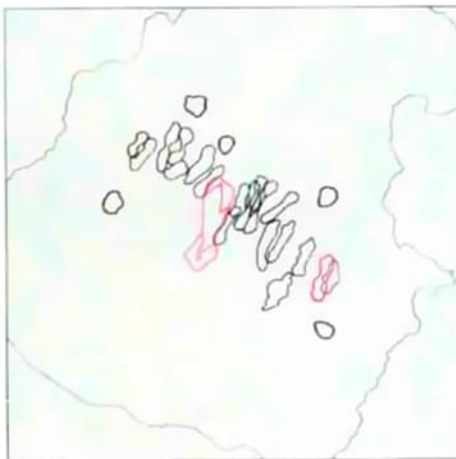
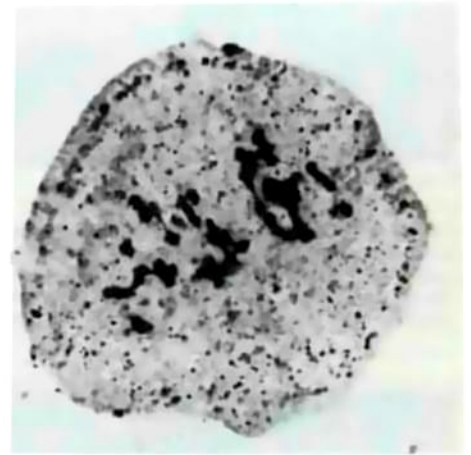
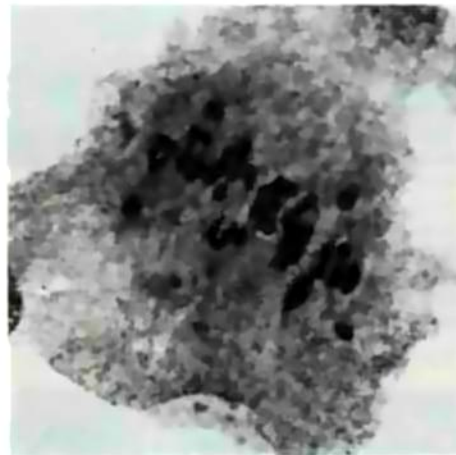
Такие признаки очень чувствительны к внешним факторам, поэтому их нужно измерять многократно и в различных условиях. Например, у большинства растений число листьев и общая площадь их поверхности значительно уменьшаются при длительном недостатке влаги. Эта реакция контролируется многими генами в общей системе приспособлений, препятствующих чрезмерной потере воды. Этот пример не исключение; в течение своей жизни растение отвечает на внешние стимулы изменением множества физиологических процессов, приспособляясь ко времени суток, к доступности питательных веществ, к флуктуациям интенсивности света, окружающей температуры, влажности атмосферы.

В сотрудничестве с Г. Секором (Университет Северной Дакоты) мои коллеги

и я получили популяцию из 65 протоконов сорта Рассет Бербанка, мы выращивали их в полевых условиях в течение нескольких лет. Количественный анализ многих признаков, важных при возделывании картофеля, надежно показал, что почти по всем этим сложным признакам в популяции были фенотипические вариации. Более того, когда подвели итог, оказалось, что все 65 протоконов популяции как-то отличались друг от друга и от родительского растения. Очень важно, что даже наиболее генетически сложные признаки, например урожай клубней, варьировали. Это наводит на мысль, что простые механизмы генетических изменений — такие, как точковые мутации — не могут быть единственной, ни даже первичной причиной вариаций.

На справедливость такого вывода указывает также стабильность окраски цветков. У сорта Рассет Бербанка белая окраска цветков определяется рецессивными ге-

нами в гомозиготном состоянии. В этом случае точковая доминантная мутация в одном гене могла бы привести к изменению окраски, скажем, на розовую. Сейчас исследовано уже несколько тысяч протоконов, и у всех были обычные белые цветки. Следовательно, если точковые мутации, проявление которых мы можем наблюдать, и происходят, они возникают значительно реже, чем изменения других типов. Этот вывод принципиально важен, ведь генетически сложные признаки обусловлены действием сразу многих генов, и, если бы точковые мутации были единственным механизмом генетической модификации протоконов, было бы мало шансов существенно улучшить такие признаки, как урожайность растений или форма и размер клубней. Иные, отличные от точковых мутаций, механизмы генетических изменений могли бы послужить основой для улучшения очень многих признаков растений.



ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ можно обнаружить в хромосомах двух клеток пыльцы, одна клетка принадлежит растению сорта Рассет Бербанка (слева), а другая — протоклону, регенерировавшему из клетки листа того же растения (справа). На микрофотографии видно спаривание хромосом, которое происходит на ранней стадии мейоза (мейоз — это половое деление клетки). Темные фигуры различной формы — это соединившиеся гомологичные хромосомы (т.е. хромосомы, гены которых выполняют одинаковые функции). Видно, что хромосомы в этих двух клетках спариваются не совсем одинаково, вероятно, вследствие структурных модификаций или перестроек в некоторых хромосомах протоклона. В клетке родительской культуры Рассет Бербанка пять неспаренных хромосом (унивалентов), 18 пар (бивалентов), одна структура из трех хромосом (тривалент) и одна из четырех хромосом (квадривалент). На рисунке униваленты показаны неровной черной линией, биваленты тонкой черной линией, тривалент неровной красной линией, а квадративалент тонкой красной линией. В клетке протоклона два унивалента, 15 бивалентов, тривалентов нет, два квадративалента и одна структура из восьми хромосом. Цепочка из восьми хромосом (изображена на рисунке пунктиром) означает, что происходит обмен генетическим материалом между негомологичными хромосомами. В клетках родительского растения такого не наблюдается. Фотографии и схемы любезно предоставлены Б. Джиллом и Л. Кэмом (Канзасский университет).



**КРАСНЫЙ ПИГМЕНТ** в клетках, полученных из протопластов листа картофеля сорта Бизон, который дает клубни с характерной красной окраской. Микрофотография сделана на 14-й день культивирования; только некоторые клетки начали накапливать пигмент. Экспрессию гена (или генов) синтеза красного пигмента можно использовать как генетический маркер в некоторых лабораторных тестах.



**КЛУБЕНЬ**, растущий на верхушке зародышевого побега на каллусе из протопластов клеток картофеля сорта Рассет Бёрбанка. Чтобы кончик побега стал образовывать клубень, необходимы особые условия культивирования. Эту методику можно использовать для исследования образования клубней в условиях контролируемой температуры и освещенности.

**ИЗ ВСЕХ** признаков, которые исследовали у протоклонов, наибольший интерес представляет урожай клубней. Почти всегда желательно увеличить урожай сельскохозяйственной культуры так, чтобы не требовалось дополнительных затрат энергии, труда и т.д. В картофелеводстве урожай учитывается как вес клубней, собранных с одного гектара, при условии, конечно, хорошего качества клубней. Качество клубней в свою очередь оценивают по размеру, единообразию формы, восприимчивости к заболеваниям, способности долго храниться и пригодности к обработке. Важно, чтобы при увеличении веса клубней не ухудшалось их качество. С другой стороны, если устранить какой-либо качественный порок, экономический эффект может быть не меньше, чем от увеличения веса.

Статистический анализ растений в наших опытах 1979 года показал, что по общему весу клубней ни один из 65 протоклонов не был лучше родительского растения. Один из протоклонов, № 307, дал урожай на 25% больше, но эта разница оказалась статистически недостоверной. В 1980 году на тех же делянках протоклон № 307 снова превосходил по весу клубней родительские растения сорта Рассет Бёрбанка, и снова данные показали недостоверными. Чтобы выяснить, действительно ли № 307 или другой протоклон более урожайен, чем исходный сорт, требуются многолетние исследования.

Ясно, конечно, что большая урожайность какого-либо протоклона в данной местности вовсе не гарантирует такой же хорошей урожайности в других географических районах. Например, в 1980 году одни и те же протоклоны посадили в Северной Дакоте и на опытном участке Р. Зинка (Колорадский университет) в Колорадо, и оказалось, что на колорадском участке продуктивность протоклона № 307 была ниже, чем у исходного сорта, а другие протоклоны, давшие низкий урожай в Северной Дакоте, превосходили по урожайности сорт Рассет Бёрбанка. В течение прошедших с тех пор пяти лет для всех 65 протоклонов также наблюдалась зависимость урожая от особенностей конкретной местности, так что ее, вероятно, следует ожидать и впредь. В таком случае наиболее продуктивные протоклоны сорта Рассет Бёрбанка, как и в случае многих других разновидностей картофеля, придется выбирать в каждом новом географическом районе эмпирически.

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ** с протоклонами картофеля разновидности Рассет Бёрбанка пока что не дали ответа на некоторые вопросы. Во-первых, будет ли наблюдаться подобный спектр фенотипических вариаций у других сортов картофеля? Нам удалось наблюдать такую изменчивость у протоклонов еще трех линий картофеля. С другой стороны, Г. Вензель и его коллеги (Институт генетики растений Макса Планка, Кёльн) сообщали, что в популяциях протоклонов диплоидных линий картофеля, которые они исследовали, постоянной фенотипической изменчивости не было. Однако, поскольку они не анализировали устойчивость к заболеваниям и другие признаки, причина расхождения их результатов с нашими требует дополнительных исследований. Возможно, на частоту и характер фенотипических вариаций влияют особенности генотипов исследованных растений или методика культивирования.



Второй вопрос касается происхождения вариаций: являются ли генетические изменения, наблюдаемые у протоклонов, результатом различий, существовавших между клетками листа еще до разделения его на протопласты, или генетические изменения индуцируются самим процессом культивирования протопластов, а может быть, имеет место и то и другое? Это очень сложный вопрос. Известно, что в клетках листа иногда происходят генетические нарушения, например меняется число хромосом. Из клеток, в которых много таких изменений, получают растения с сильными абберациями. В клетках листа наблюдались также точковые мутации и соматическая рекомбинация (изменение расположения генов в хромосомах соматических клеток). Итак, в листьях некоторых видов растений могут происходить как глубокие, так и более тонкие генетические изменения; если протопласты измененных клеток культивировать, то их признаки передадутся всем клеткам регенерировавшего растения.

Д. Ингрэм и Р. Бреттел (Кембриджский университет) рассматривают изменчивость протоклонов картофеля как указание на то, что генетические вариации в популяциях клеток листа характерны для всех вегетативно размножающихся растений. Если это так, то, по их мнению, в листе как бы хранится множество скрытых генетических вариаций. Эта идея весьма привлекательна, однако можно и иначе объяснить наблюдаемую изменчивость. Так, процесс выделения протопласта и начальные условия культивирования наверняка травмируют клетку, которая развивалась в совершенно иных условиях. Такой шок мог бы провоцировать ошибки в первом цикле (или циклах) репликации ДНК, ошибки, которые проявились бы как фенотипические изменения в целом растении.

Кроме того, протопласты культивируются не поодиночке; исходно на 1 мл культуры приходится обычно 10 000 или более протопластов. Некоторые клетки погибают, а их содержимое попадает в культуральную среду. В растениях синтезируются вещества, являющиеся мутагенами, — алкалоиды и флавоноиды; если их концентрация в среде заметно повышается, они могут вызвать генетические изменения.

Чтобы проверить эту возможность, мы сравнили растения, регенерировавшие из протопластов, с растениями, регенерировавшими из каллюсов клеток, полученных из того же листа картофеля, что и протопласты, но не лишенных оболочек. По нашим данным, получается, что в популяциях растений, регенерировавших из каллюсов целых клеток, доля сильных аббераций примерно такая же, как в популяциях из протоклонов; однако фенотипических вариаций не наблюдалось. В этих опытах растения выращивали в теплице, так что необходимо исследовать эти клоны еще и в полевых условиях, чтобы выяснить, есть ли в популяции какие-либо вариации. Так или иначе, фенотипические вариации значительно разнообразнее, и частота их выше для растений, регенерировавших из протопластов, чем для растений, выращенных из каллюсов целых клеток листа.

Наиболее важным остается вопрос, какие генетические механизмы в соматических клетках картофеля обеспечивают наблюдаемые в протоклонах фенотипические вариации. Пока что можно лишь строить предположения. Как я уже гово-

рил, сорта картофеля генетически очень сложны, а большинство исследованных изменчивых признаков контролируется многими генами. Причины генетического изменения обычно устанавливают, анализируя наследование изменчивого признака при половом размножении. В случае картофеля такой подход мало эффективен, поскольку в самоопыляющихся линиях картофеля изменчивость в потомстве по данному признаку не меньше, а иногда даже больше, чем в популяциях протоклонов. Генетические исследования Б. Джилла (Канзасский университет) показали, что, хотя в клетках всех протоклонов содержится одно и то же число хромосом (48), в некоторых клетках явно происходят хромосомные изменения (см. рисунок на стр. 61). Было бы преждевременно делать вывод, что изменения структуры хромосом или другие подобные явления — основная причина наблюдаемой изменчивости, однако они, несомненно, заслуживают серьезного внимания.

**Б**УДЕТ ли метод регенерации растений из протопластов полезным для селекции сельскохозяйственных культур? Определенные перспективы, по-видимому, есть, но необходимы дальнейшие исследования. Несколько сот протоклонов — недостаточная база, чтобы оценить возможности метода. Для нас сейчас важно скорее общее значение разработанного подхода, а не ценность отдельных протоклонов для сельского хозяйства. Когда накопятся данные о протоклонах других сельскохозяйственных культур, будет легче говорить о возможностях применения нашего метода для улучшения сортов культурных растений.

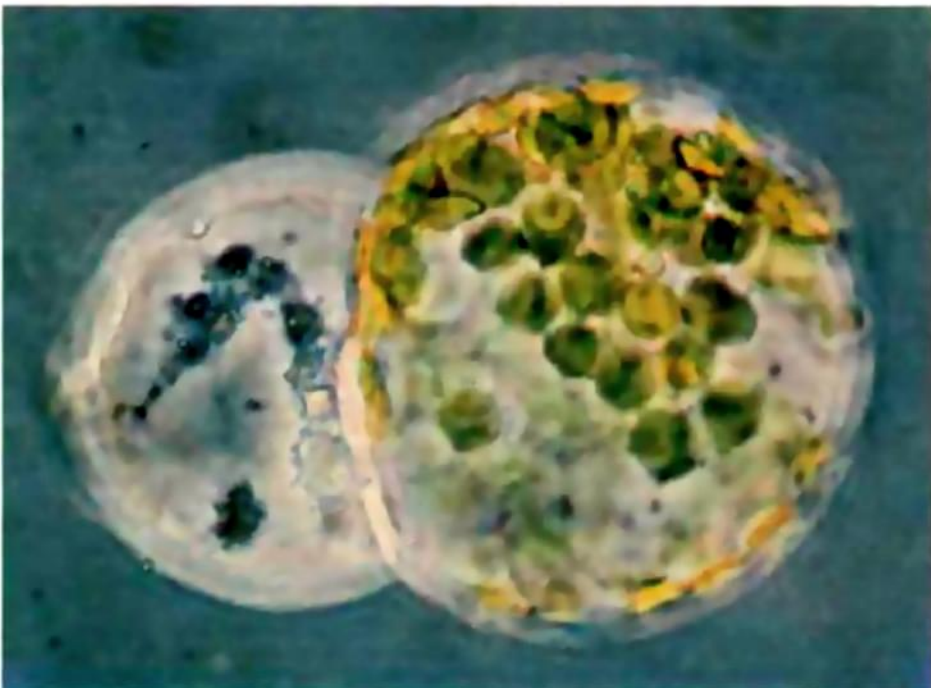
Для перспектив метода протоклонов очень существенно, что важные количественные признаки растений подвержены изменениям; надежды на успех сильно возрастут, если мы научимся эффективнее отбирать клетки и колонии в лабораторных условиях. Это позволило бы экспериментатору просматривать сразу много ге-

нотипов и быстро выбирать индивидуумы с полезными изменениями. Некоторые исследователи уже добились успеха с популяциями протопластов табака, пелунии и некоторых других растений в случае просто наследуемых признаков, например устойчивости к гербицидам. Сложные признаки гораздо труднее учитывать, в этом случае системы отбора должны основываться на физиологических или генетических особей чистоты вида.

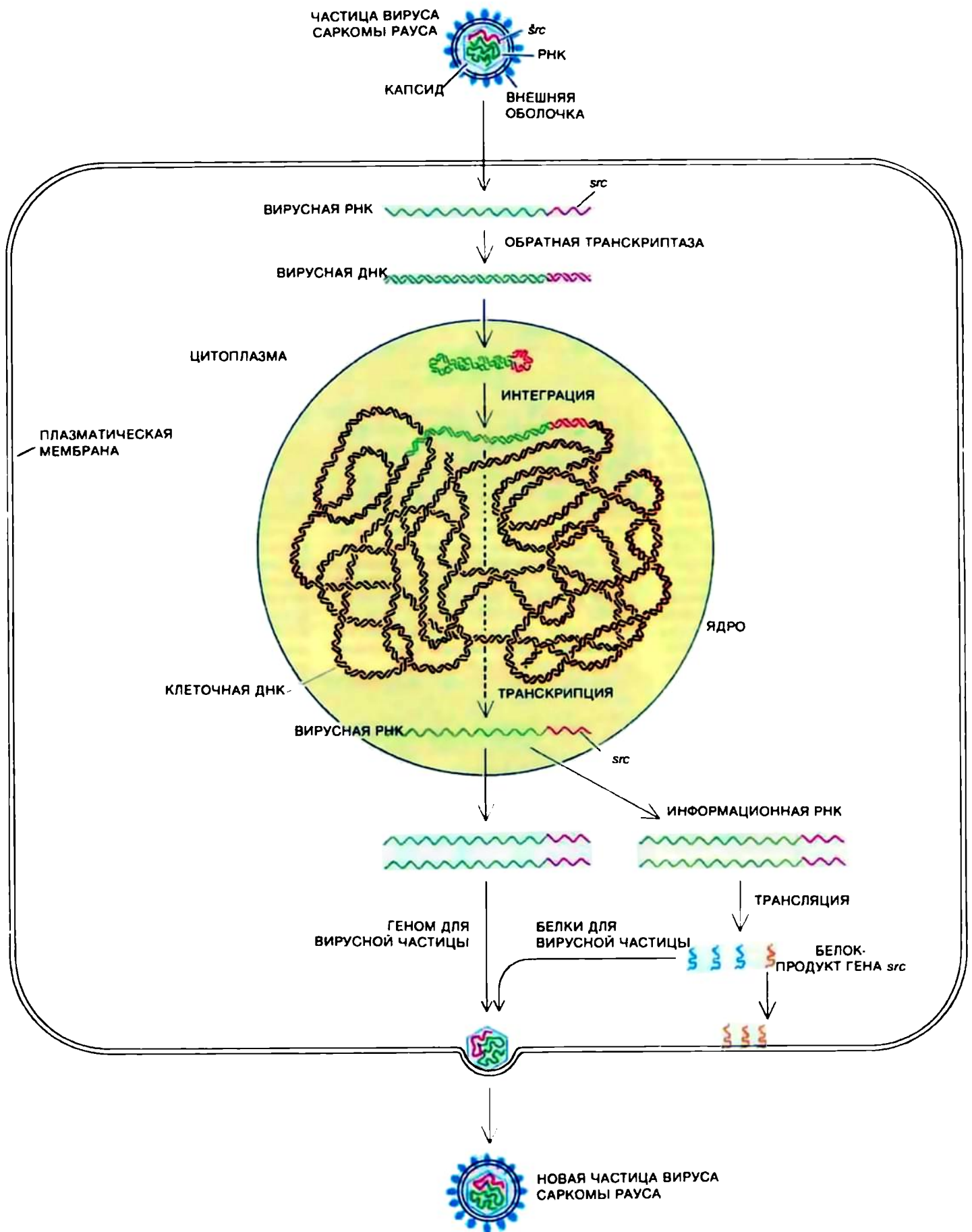
В качестве примера рассмотрим сорт картофеля под названием Бизон, который дает клубни красного цвета. Когда протопласты клеток листа растения этой разновидности культивируют в определенных условиях, они утрачивают зеленый цвет и накапливают красные пигменты — антоцианы. Когда потребуется идентифицировать геном культуры Бизон, экспрессия (т.е. выражение, проявление) гена (или генов), определяющего синтез антоцианов, может послужить генетическим маркером для отбора клеток.

У небольших каллюсов, полученных из протопластов и имеющих зачаточные корни, можно индуцировать образование клубней. Возможно, в дальнейшем удастся подобрать условия для получения протоклонов, у которых формирование клубней менее чувствительно к температуре или времени суток.

Наконец, широкие возможности для создания новых гибридных линий открывает метод объединения (слияния) протопластов генетически различных растений до стадии регенерации. Работа в этом направлении ведется и в нашей группе, и другими исследователями. Например, недавно нам удалось соединить протопласт из листа картофеля с протопластом из листа томата. Нам хотелось ввести определенные гены томата (в том числе гены устойчивости к некоторым заболеваниям) растения картофеля. Таким способом можно будет получать комбинации генов растений, которые не скрещиваются, и тем самым увеличить резерв наследственного материала для селекции.



**СЛИЯНИЕ ПРОТОПЛАСТОВ**, выделенных из генетически различных растений, можно использовать для улучшения свойств протоклонов. В недавних экспериментах, выполненных автором и его коллегами, протопласт из листа картофеля сорта Рассвет Бэрбанка (бесцветный) соединили с нормальным протопластом из листа томата (зеленый) с целью ввести гены устойчивости томата к некоторым заболеваниям в геном картофеля.



ОНКОГЕН *src*, который индуцирует рак (саркому) у цыплят, является частью РНК вируса саркомы Рауса — одного из ретровирусов. При инфекции клетки ретровирусом вирусная РНК копируется с образованием двухцепочечной ДНК под действием фермента обратная транскриптаза, который предоставляется вирусом. Эта ДНК замыкается в кольцо, а затем встраивается в ДНК клетки-хозяина. Когда ДНК клетки-хозяина транскрибируется с образованием РНК с помощью клеточных ферментов (не показано), транскрибируется также вирусная ДНК (пунктирная стрелка). Некоторые вирусные РНК — копии вирусного гено-

ма — включаются в новые вирусные частицы, а другие подвергаются процессингу с образованием информационных РНК, транслирующихся клеточным белоксинтезирующим аппаратом с образованием вирусных белков. Какие-то из этих белков войдут в состав новых вирусных частиц. Продукт гена *src* не является компонентом вирусных частиц. Это фермент — протеинкиназа; он связывается с внутренней поверхностью плазматической мембраны и фосфорилирует клеточные белки, превращая таким образом нормальную клетку в раковую.

# Онкогены

*Это гены, вызывающие рак. Впервые их нашли у вирусов, но история эволюции заставляет полагать, что и в нормальных клетках позвоночных животных есть гены, аномальная экспрессия которых может привести к злокачественному росту*

ДЖ. МАЙКЛ БИШОП

**М**ОЖНО ли понять природу раковой клетки? Уж если не удалось еще объяснить, как регулируется рост нормальной клетки, казалось бы, навряд ли думать, что мы расшифруем законы, регулирующие аномальный рост раковой клетки. Тем не менее в истории биологии есть много примеров того, что исследование аномалий помогает понять нормальные жизненные процессы. Новейшие достижения в изучении рака — еще один яркий пример такого рода. Впервые исследователи смогли составить приблизительную схему индуцирования злокачественного роста. Идентифицированы как ферменты, катализирующие эти процессы, так и гены, кодирующие структуру ферментов.

Такой успех достигнут благодаря изучению вирусов, индуцирующих опухоли. В последние годы упорно пытались найти вирусы, вызывающие рак у человека. Поиски по большей части оказались бесплодными, и многие известные ученые стали сомневаться в том, что именно вирусы — главная причина рака у человека. Некоторые вирусы действительно индуцируют опухоли у животных. Изучая эти вирусы, ученые пытались определить, какие же существенные изменения в клетке приводят к злокачественному росту. Этот путь оказался наиболее плодотворным.

Хотя гены, вызывающие рак, были впервые обнаружены при работе с вирусами, они тем не менее не вирусного происхождения. Более того, оказалось, что эти гены встречаются не только в раковых клетках. Они имеются и функционируют и в нормальных клетках и, возможно, так же необходимы для нормальной жизнедеятельности, как и для неограниченного роста раковой опухоли. Возможно, что на конечном этапе возникновения опухолей действует механизм, изначально генетически присущий всем живым клеткам.

## Опухолевые вирусы

Вирус — это немногим более чем генетическая информация, заключенная в белковую оболочку. Носителем информации может быть ДНК или РНК (в клетках более сложных организмов генетическая информация хранится только в ДНК). Как ДНК, так и РНК представляют собой длинные нити, составленные из химических звеньев четырех типов — эти звенья называют нуклеотидами. Последовательность нуклеотидов — это закодированная информация, она разбита на отдельные единицы — гены. Инструкции, «записанные» в генах, выполняются различными путями. Как правило, последовательность нуклеотидов определяет порядок расположения аминокислот в данном белке — ферменте или структурном элементе. В вирусах число генов может быть

менее пяти и никогда не превышает нескольких сотен, тогда как клетки более сложных организмов имеют геном (так называют весь набор генов данного организма), состоящий из десятков тысяч генов. Размножение вирусов похоже на процессы роста и деления клеток, но организованы они по сравнению с клетками проще и изучать их поэтому легче.

В клетках ДНК транскрибируется с образованием цепи информационной РНК, а затем РНК транслируется с образованием белка. Инфицирующий вирус внедряет свою генетическую информацию в аппарат клетки, и клетка начинает по вирусным генам синтезировать вирусные белки. Белки участвуют в синтезе множества копий вирусного генома, образуют новые вирусные частицы и выполняют другие «приказы» вирусных генов. Случается, что какая-то из команд такого приказа заставляет клетку-хозяина превращаться в раковую клетку.

О существовании опухолевых вирусов стали догадываться в начале нашего века. Решающее открытие было сделано в 1910 г., когда в Институте медицинских исследований Рокфеллера П. Раус показал, что не содержащий клеток фильтрат опухолей (сарком) цыплят может индуцировать саркому у других цыплят. Результаты Рауса были приняты холодно; в конце концов ему пришлось оставить работу над опухолевыми вирусами.

Прошел не один десяток лет, прежде чем реальность существования вирусов, впервые идентифицированных Раусом, а также других опухолевых вирусов была доказана методами физической очистки и электронной микроскопии. Опухолевые вирусы стали широко применять в исследованиях рака. В 1966 г., в возрасте 85 лет, Раус был удостоен Нобелевской премии.

Одни опухолевые вирусы онкогенны (т.е. индуцируют опухоли) только для животных, не являющихся их природными хозяевами, другие онкогенны для своего естественного хозяина. Такие различия не всегда можно объяснить, но для исследователя они не имеют существенного значения. Возможность произвольно индуцировать опухоли с помощью относительно простого и легко идентифицируемого агента очень важна при исследовании рака, пусть даже порой приходится прибегать к неестественному сочетанию вируса и хозяина.

## Трансформация

Многие опухолевые вирусы обладают особенно ценным свойством: они вызывают раковое перерождение клеток, культивируемых в искусственной среде. Такая «трансформация» клеток в культуре дает возможность изучать взаимодействие опухолевого вируса с клеткой-хозяином в

контролируемых условиях и избегать при этом трудностей, связанных с экспериментами на животных. Следует помнить, однако, что некоторые опухолевые вирусы, не трансформирующие клетки в культуре, тем не менее являются сильными онкогенными агентами для животных.

Способность или неспособность вируса трансформировать культивируемые клетки связана с конкретным механизмом онкогенеза. В настоящее время различают два пути развития опухоли. В некоторых вирусах есть всего один ген, ответственный за их способность индуцировать опухоли, иногда таких «онкогенов» несколько. Вирусные гены действуют быстро, их активность превосходит активность всех других генов в клетке. Большинство вирусов, имеющих онкогены (а возможно, и все), могут трансформировать клетки в культуре; способность к трансформации, стало быть, — указание на то, что в данном вирусе есть онкоген. В других опухолевых вирусах онкогены отсутствуют, и то, что они индуцируют опухоли, уловить труднее. Такие вирусы действуют медленно, часто проходит 6 — 12 месяцев, прежде чем в организме животного начнет расти опухоль, в то время как под воздействием онкогенных вирусов опухоль возникает уже через несколько дней или недель.

Оба пути онкогенеза характеризуются присутствием в клетке-хозяине вирусного генома вплоть до гибели клетки. В большинстве случаев вирусная ДНК интегрирована (т.е. химически соединена) с ДНК клетки-хозяина, но геном некоторых опухолевых вирусов существует в клетках как отдельная единица и размножается независимо. В настоящее время считается, что сохранность вирусного генома необходима для онкогенеза — это обеспечивает либо проявление онкогена, либо какой-то другой механизм воздействия на клетку — в случае опухолевых вирусов, не содержащих онкогенов. Одно время в связи с загадками вирусного онкогенеза была популярна гипотеза «партизанской тактики» воздействия вируса, согласно которой кратковременная вирусная инфекция инициирует цепочку событий, завершающихся образованием опухоли, причем дальнейшее присутствие вируса в опухолевой клетке не является необходимым. Доказательств в пользу такой модели пока мало.

## Ретровирусы

Вирус саркомы, открытый Раусом, относится к группе ретровирусов; среди опухолевых вирусов они единственные РНК-содержащие. На основании исследований ретровирусов создана наиболее ясная и последовательная концепция онкогенеза.

Вирусы этой группы оказались очень полезны при изучении развития опухолей по следующим трем причинам. Во-первых, ретровирусы найдены у многих видов позвоночных животных, они индуцируют опухоли самых разных типов, давая тем самым возможность экспериментально моделировать важнейшие формы рака человека. Во-вторых, онкогены ретровирусов довольно легко идентифицировать, выделить и обнаружить их продукты; благодаря этому удалось, хотя бы в общем, представить себе химические процессы, связанные со злокачественным ростом. В-третьих, онкогены ретровирусов, очевидно, не принадлежат геному самого вируса; напротив, они, похоже, являются копиями генов клеток позвоночного животного-хозяина, в которых вирусы реплицируются. Есть основания полагать, что те самые клеточные гены, от которых, видимо, происходят онкогены ретровирусов, участвуют в развитии опухолей, индуцированных не вирусами, а другими агентами. Таким образом, занимаясь вопросами эволюции онкогенов, вирусологи пришли к генетическим механизмам, которые, возможно, лежат в основе многих форм рака.

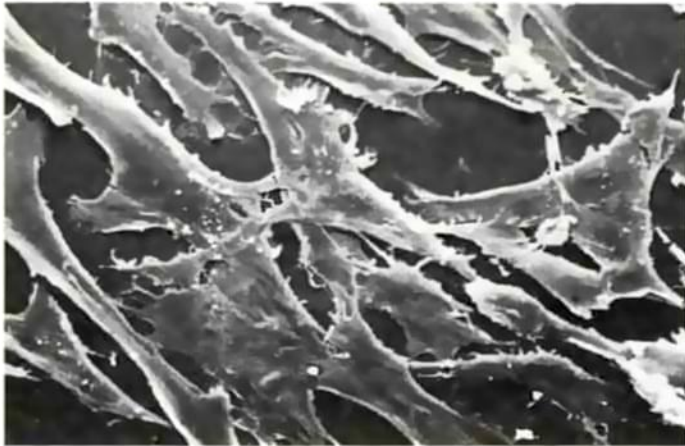
Ретровирусы получили свое название по одной из характерных черт их своеобраз-

ного жизненного цикла: для размножения этих вирусов их РНК должна транскрибироваться «обратно» с образованием ДНК. Этот необычный процесс обслуживается ферментом, который называется обратной транскриптазой. В 1970 г. Д. Балтимор (Массачусетский технологический институт), С. Мишутани и Г. Темин (Висконсинский университет) обнаружили этот фермент в частицах вирусов типа вируса саркомы Рауса. Открытие обратной транскриптазы было важно по нескольким причинам. Оно опрокинуло общепринятое тогда представление, что генетическая информация может передаваться только в одном направлении: от ДНК к РНК. Пришла ясность в проблему механизма репликации вирусов, что вызвало целую волну исследований на ретровирусах. Наконец, развивающаяся генетическая инженерия получила принципиально новый метод для работы с рекомбинантной ДНК.

Жизненный цикл ретровирусов — это замечательный пример взаимодействия между паразитом и хозяином. Успех вирусной инфекции зависит от клетки-хозяина, ее гостеприимства, так сказать; тем не менее вирус сохраняет контроль над событиями. На первых этапах инфекции вирусный геном, представляющий со-

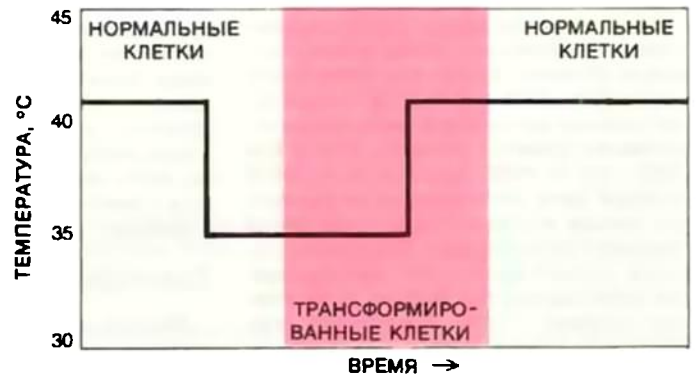
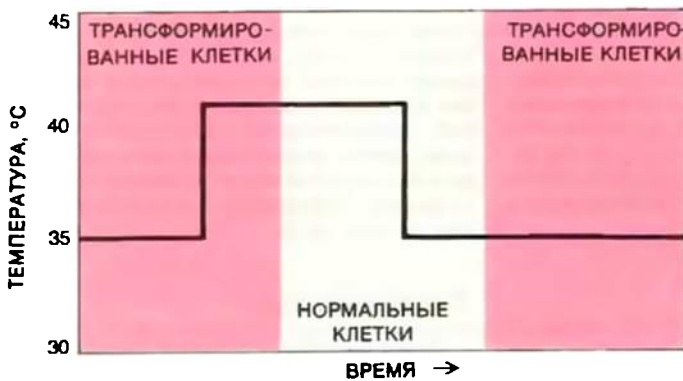
бой РНК, транскрибируется с образованием ДНК с помощью обратной транскриптазы. Затем вирусная ДНК встраивается в геном клетки-хозяина, после чего вирусные гены реплицируются наряду с клеточными и экспрессируются аппаратом клетки.

Во многих случаях инфекция ретровирусом безвредна для клетки. Вирус обретает новый дом, и, может статься, надолго; образуются и покидают клетку новые вирусные частицы, а клетка тем временем несколько не страдает. Однако такое содружество может окончиться плачевно из-за какого-либо из двух описанных выше видов вирусного онкогенеза. Если вирус содержит онкоген, его деятельность может вызвать злокачественный рост клетки. Если онкоген отсутствует, встраивание вирусной ДНК в геном клетки может изменить какой-либо клеточный ген в месте внедрения чужеродной ДНК или около него, другими словами, вызвать мутацию. Мутации в определенных участках генома клетки-хозяина могут вызвать ее злокачественный рост. Индуцирование опухолей онкогенами и развитие опухолей как следствие интеграции вирусной ДНК на первый взгляд не имеют ничего общего, но дальше мы покажем, что они связаны самым тесным образом.



ТРАНСФОРМАЦИЯ культивируемых клеток вирусом саркомы Рауса (микрофотографии сделаны Г. Мартином из Калифорнийского университета в Беркли с помощью сканирующего электронного микроскопа). Нормальные фибробласты (клетки соединительной ткани), прилипшие к поверхности чашки, где их культиви-

руют, имеют плоскую вытянутую форму (слева). После инфицирования вирусом саркомы Рауса клетки становятся округлыми и образуют беспорядочные скопления (справа), как полагают, вследствие фосфорилирования клеточных белков ферментами — продуктами гена *src*.



«УСЛОВНАЯ» МУТАЦИЯ выражается в обратимой инактивации гена или же фермента, который он кодирует. В случае температурочувствительных мутантов *src* инфицированные клетки трансформируются при 35° С и остаются (или же вновь становятся)

нормальными при 41° С. Существование таких мутантов означает, что за трансформацию отвечает вирусный ген, действие которого опосредуется его белком-продуктом, и что для трансформации необходима неизменная активность этого гена.

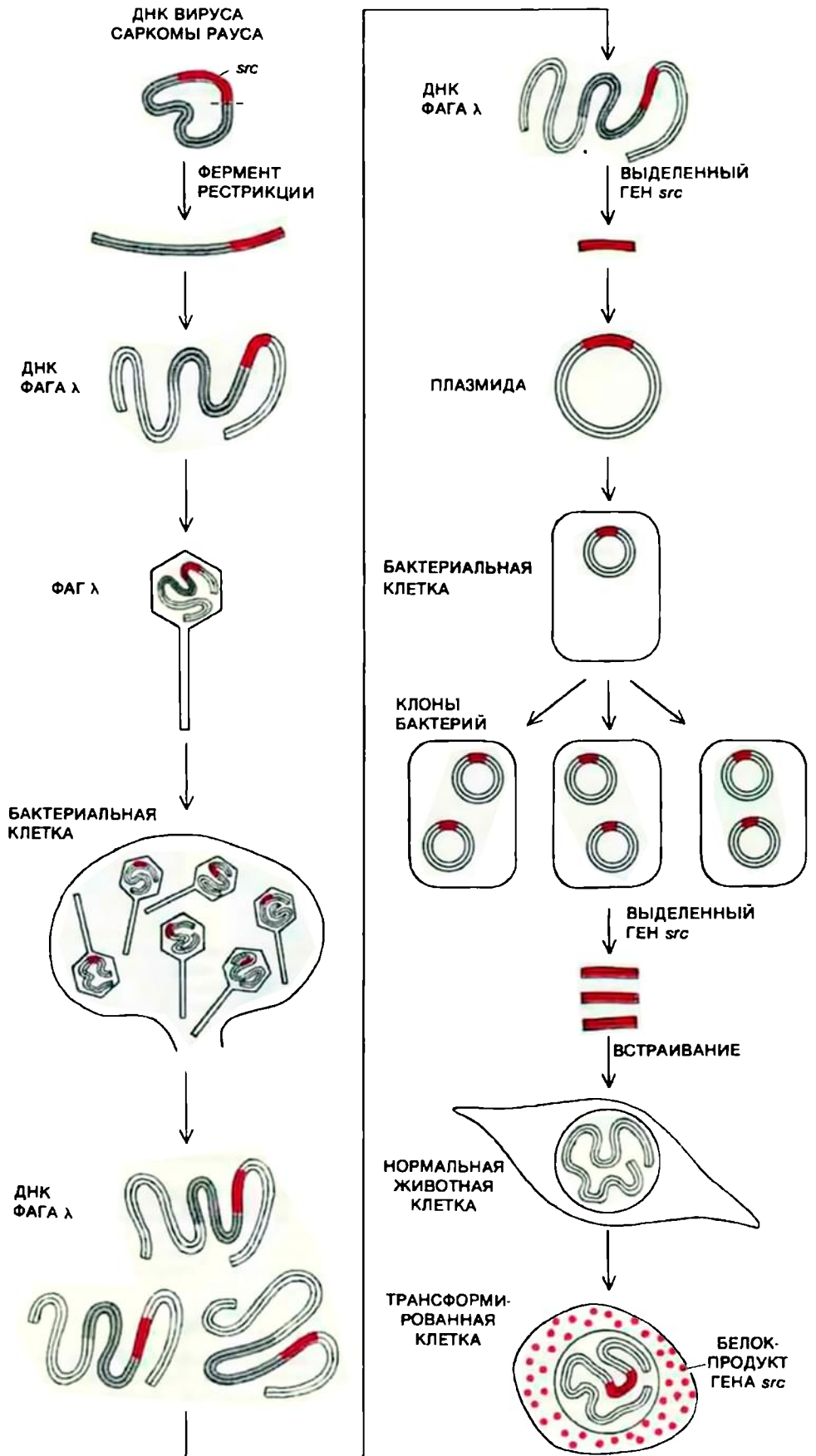
**Ген src**

Впервые экспериментально исследовать удалось вирус саркомы Рауса. В 1970 г. Г. Мартин (Калифорнийский университет, Беркли) идентифицировал температурочувствительные «условные» мутации, изменявшие способность вируса трансформировать клетки в культуре. «Условные» мутации — мощное средство анализа, так как они позволяют обратимо инактивировать ген. Культивируемые клетки, инфицированные чувствительными к температуре вирусами саркомы Рауса, при перmissive («разрешающей») температуре трансформировались. При повышении температуры до рестриктивной («ограничивающей») клетки через несколько часов обретали прежний нормальный вид, а затем вновь трансформировались, если температуру опять снижали. Это явление объясняется тем, что при рестриктивной температуре мутантный ген инактивируется. Трансформация, таким образом, зависит от активности гена, который для того, чтобы поддерживать состояние злокачественного роста, должен экспрессироваться постоянно. В большинстве случаев повышенная температура воздействует не прямо на ген — в результате мутации изменяется структура белка — продукта гена таким образом, что при рестриктивной температуре активность этого белка уменьшается.

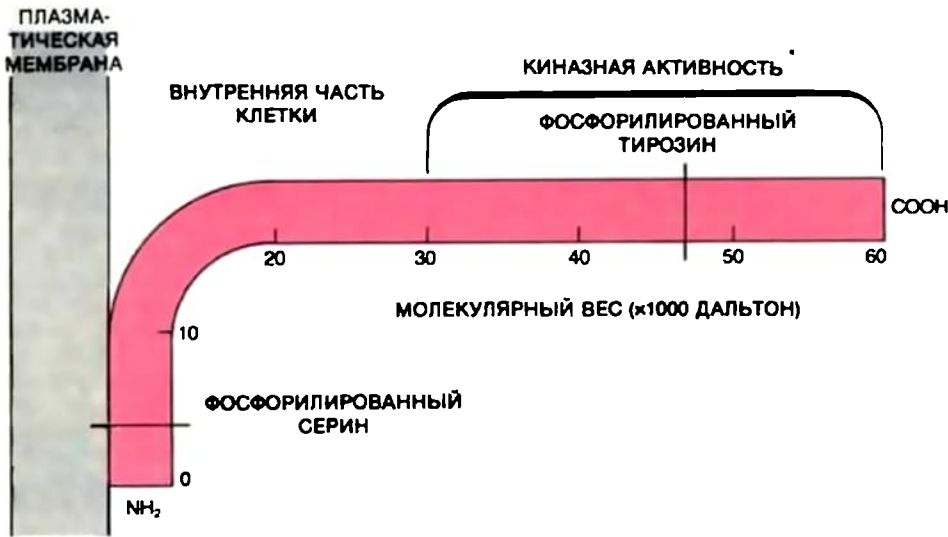
Ген, открытый Мартином, сейчас называют ген *src* (от sarcoma — опухоль, которую он индуцирует); это онкоген вируса саркомы Рауса. Ген *src* подробно изучен П. Дьюсбергом (Беркли) и Ч. Вейсманом, М. Биллетером и Дж. Коффином (Цюрихский университет). Они работали со штаммами вируса саркомы Рауса, которые выделил П. Вогт (Южно-Калифорнийский университет) и которые представляли собой мутанты, потерявшие онкоген в результате делеции и поэтому неспособные индуцировать опухоли или трансформировать клетки в культуре. Дьюсберг и Вейсман и его коллеги с помощью фермента рибонуклеазы получили фрагменты геномов таких мутантов и вирусов дикого типа (онкогенных). Определяя, какой фрагмент отсутствует у мутантов, ученые идентифицировали онкоген — это участок РНК вблизи одного из концов генома вируса саркомы Рауса.

В последние годы разработаны новые действенные методы генетической инженерии, они позволяют более точно определять онкогены и изучать их онкогенный потенциал. Мы теперь умеем разрезать ДНК на фрагменты в определенных точках с помощью набора ферментов рестрикции — эндонуклеаз. Нужные фрагменты можно затем размножить в бактериях, вновь выделить, уже в большем количестве, и вводить их в культивируемые клетки, где гены будут экспрессироваться. Можно разрезать вирусную ДНК на отдельные гены и выяснить, какой из них вызывает трансформацию. Так, при анализе ДНК вируса саркомы Рауса выявлен один ген, способный трансформировать клетки; этот ген кодирует один белок. Следовательно, один ген, направляя синтез одного белка, может вызывать раковое перерождение клетки. В данном случае выявить этот белок и узнать, как он действует, — значит понять механизм злокачественного роста.

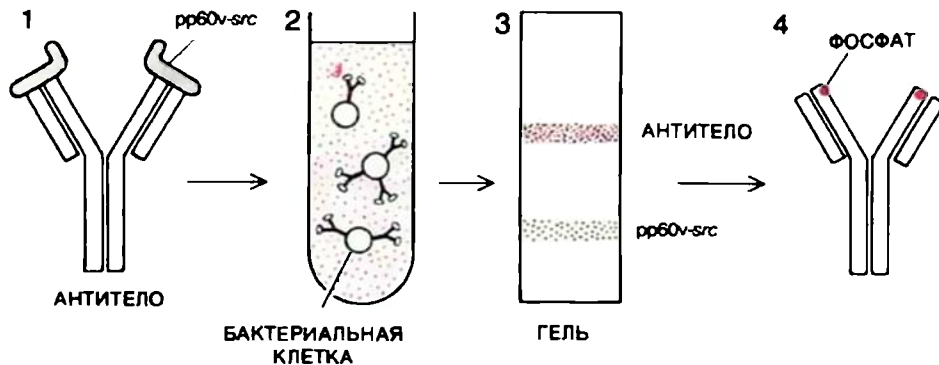
Белок — продукт гена *src* — известен в основном благодаря работам Р. Эриксона и его коллег (Медицинская школа Колорад-



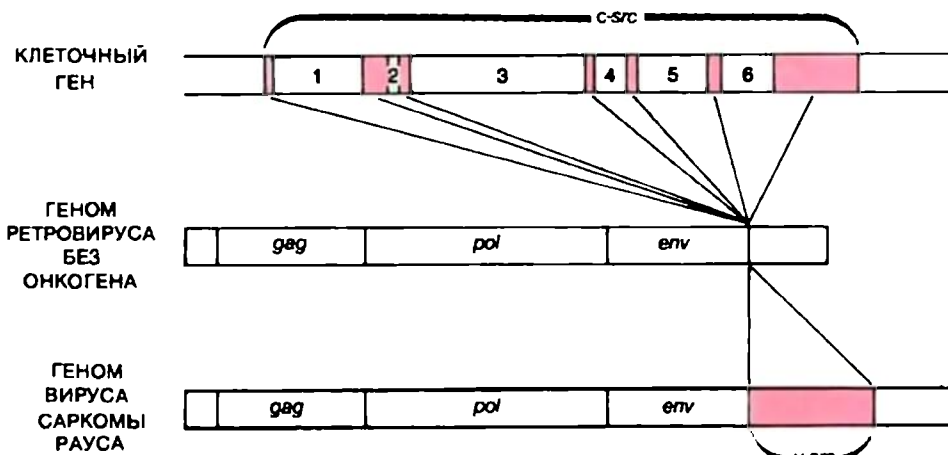
ВИРУСНЫЙ ОНКОГЕН очистили и исследовали его способность трансформировать клетки, применив методы генетической инженерии. Из недавно инфицированных клеток выделяют кольцевую ДНК вируса саркомы Рауса, расщепляют ее ферментами рестрикции и встраивают в ДНК фага λ (фаг λ — вирус бактерий). В результате размножения фага в бактериях образуется много вирусной ДНК, которую расщепляют ферментами рестрикции так, чтобы получить кусочки, содержащие только ген *src* и небольшой участок прилегающей ДНК. Этот фрагмент встраивают в плазмиду (плаزمид — это небольшая кольцевая бактериальная ДНК), которую вводят в бактерии для дальнейшего размножения. Из плазмид можно вырезать множество копий фрагмента с геном *src*, очистить их и включить в культивируемые животные клетки. Эти фрагменты запускают синтез вирусного белка, вызывающего трансформацию. У. Де Лорб и П. Люси экспериментально показали, что одного только гена *src* достаточно для начала злокачественного роста.



**ПРОДУКТ ОНКОГЕНА** белок *pp60v-src* представляет собой цепь примерно из 520 аминокислот. Это протеинкиназа — фермент, который присоединяет фосфатные группы к белкам. Белок связан с плазматической мембраной клетки участком вблизи  $\text{NH}_2$ -конца; фосфорилирующий участок находится на другом конце молекулы. Сам фермент фосфорилирован в двух местах.



**ПРОТЕИНКИНАЗНАЯ АКТИВНОСТЬ** белка *pp60v-src* была обнаружена случайно. У кроликов, у которых опухоли индуцировали вирусом саркомы Рауса, образуются антитела к белку *pp60v-src*, эти антитела соединяются с белком (1). Комплексы белок — антитело закрепили на поверхности бактерий и добавили в среду радиоактивный фосфат (цветные точки) (2). Когда белок *pp60v-src* отделили от антител с помощью гелеэлектрофореза, радиоактивность обнаружилась на геле в полосе антител (3); иммобилизованный на бактериях белок *pp60v-src* катализировал перенос фосфата на аминокислоту тирозин; в каждой из двух тяжелых цепей молекулы антитела имеется по одному центру фосфорилирования (4).



**КЛЕТОЧНЫЙ ГЕН *c-src*** (вверху) состоит из экзонов (цветные) и интронов (серые). Клеточный ген был каким-то образом захвачен предками нынешних ретровирусов; интроны были утрачены, а соединившиеся экзоны встроились в вирусный ген (посредине), и образовался генетический вирус саркомы Рауса (внизу). Кроме гена *src* в него входят также гены *gag* (кодирует белок вирусного капсида), *pol* (кодирует фермент обратную транскриптазу) и *env* (кодирует гликопротеидные выросты вирусной оболочки). Считается, что и другие вирусные онкогены имеют аналогичное происхождение.

ского университета). Они начали работу с идентификации белка, который синтезировался *in vitro* с генома вируса саркомы Рауса дикого типа и не образовывался в случае мутантных геномов, утративших ген *src* в результате делеции. Затем у кроликов вызвали образование антител к предполагаемому белку гена *src*, индуцируя у них опухоли вирусами саркомы Рауса. Антитела специфически соединялись с белком, синтезированным *in vitro*, а также с идентичным ему белком в клетках, трансформированных геном *src*. С помощью этой методики удалось определить белок — продукт гена *src*, который ответствен за эффекты этого гена. Белок назвали *pp60 v-src*; «pp» означает, что это фосфопротеин (белок с прикрепленной к нему фосфатной группой), «60» — мол. вес 60 000, а «v-*src*» обозначает генетическую природу этого белка как продукта вирусного гена *src*.

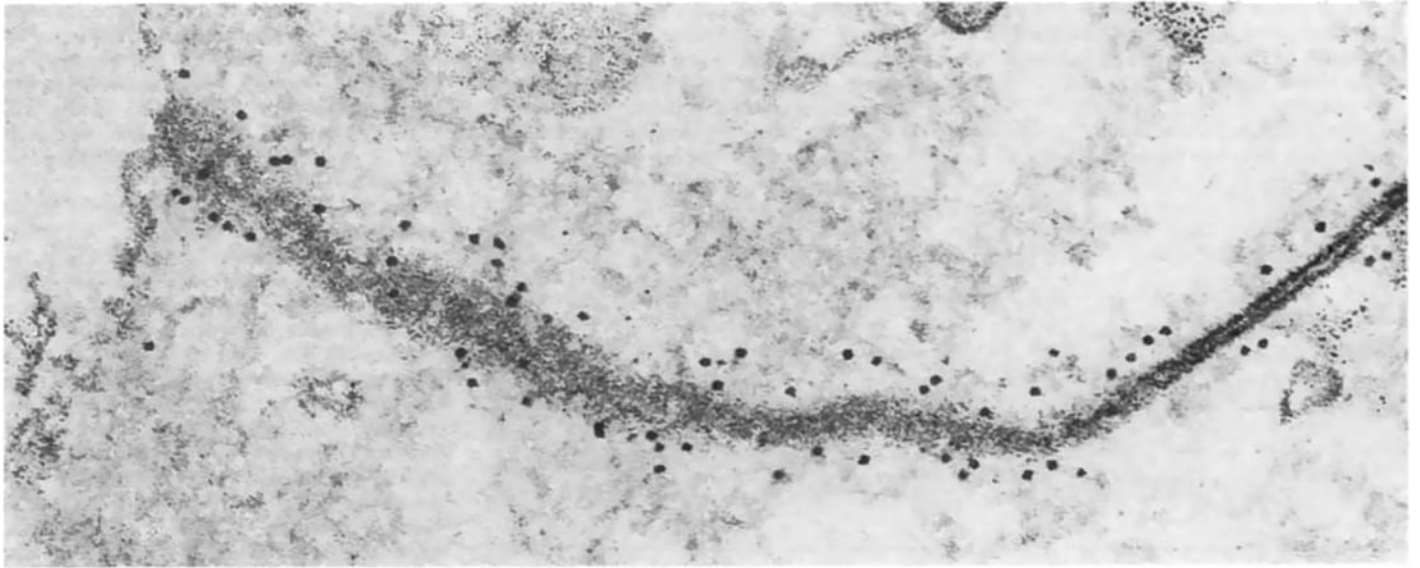
### Раковый фермент

Каким же образом продукт гена *src* вызывает злокачественный рост клетки? Когда впервые выделяли этот белок, проблема пугала своей сложностью. Обнаружилось, что белок *pp60v-src* является протеинкиназой, т.е. ферментом, который присоединяет ионы фосфата к аминокислотным остаткам белков в реакции фосфорилирования. Это открытие сделали Р. Эрикссон и его коллега М. Коллет и независимо от них А. Левинсон, Г. Вармус и автор этой статьи в лаборатории Медицинской школы Калифорнийского университета в Сан-Франциско.

Вскоре Т. Хантер и Б. Сефтон (Институт биологических исследований Солка) сообщили, что белок *pp60v-src* присоединяет ионы фосфата только к аминокислоте тирозину. Это ставит белок *pp60v-src* вне известных групп протеинкиназ, которые фосфорилируют аминокислоты серин и треонин. Оказалось, что фосфорилирование тирозина — общее свойство ферментов — продуктов онкогенов; как ни странно, оно характерно и для регуляции роста нормальных клеток.

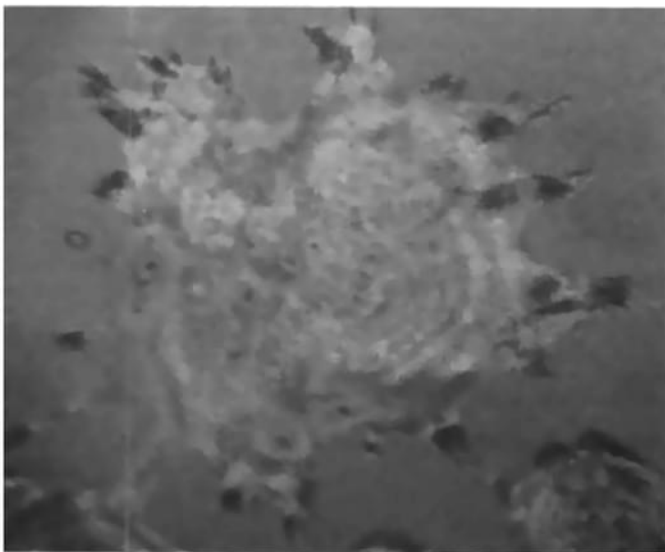
Совсем недавно фосфат казался многим биологам простым и понятным, а его присоединение к белкам — незначительным явлением. Сейчас ясно, что фосфорилирование белков — одно из основных средств регуляции активности ферментов в растущей клетке. Один фермент, фосфорилируя ряд белков, может влиять на функционирование всей клетки. В случае с белком *pp60v-src* предложено два механизма. Фермент может фосфорилировать один белок, включая каскад событий, которые ведут к злокачественному перерождению клетки; второй возможный путь — фермент фосфорилирует несколько белков, прямо влияя на функционирование каждого из них, что в свою очередь вызывает события второго порядка или же их каскад. Судя по тому немногому, что уже известно, представляется вероятным, что второе предположение верно описывает механизм действия белка *pp60v-src*.

Можно ли фосфорилированием тирозина в клеточных белках объяснить способность гена *src* индуцировать опухоли? Хантер и его коллеги показали, что в результате трансформации клетки геном *src* количество фосфорилированного тирозина в клетке увеличивается приблизительно в десять раз. Это увеличение считается проявлением активности белка *pp60v-src*.

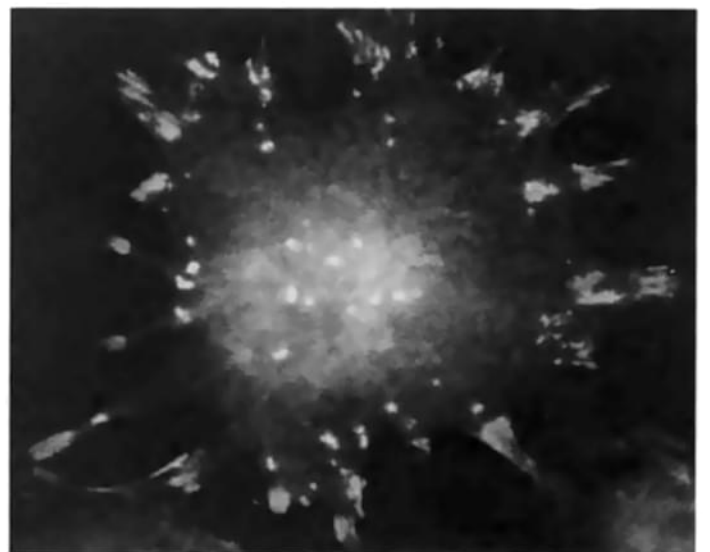


**ЛОКАЛИЗАЦИЯ** белка — продукта гена *src*. Тонкий слой клеток, инфицированных вирусом саркомы Рауса, обработали кроличьими антителами к белку *pp60v-src*; к антителам с помощью вторых антител присоединили электроплотное вещество ферритин. Кроличьи антитела связались с белком *pp60v-src*, выявив его ло-

кализацию вдоль плазматических мембран двух соседних клеток благодаря темным пятнам ферритина. Электронные микрофотографии получены М. Виллингемом и И. Пастан (Национальный институт рака).



**АДГЕЗИВНЫЕ БЛЯШКИ**, с помощью которых клетки прикрепляются к твердой поверхности. Белок *pp60v-src* воздействует непосредственно на адгезивные бляшки. (Микрофотографии получены Л. Роршнайдером в Центре по изучению рака Фреда Хатчинсона, Сизтл). При интерференционной микроскопии (*слева*) адге-



зивные бляшки, контактирующие с твердой поверхностью, выглядят темными. Когда ту же клетку обработали антителами к белку *pp60v-src*, помеченными флуоресцирующим красителем, в ультрафиолетовом свете стало видно, что большая часть белка находится в адгезивных бляшках (*справа*).

На сегодняшний день важно выяснить, какие клеточные белки фосфорилируются ферментом и каковы их функции. Есть несколько гипотез, но ни одна из них пока что не может объяснить неограниченный рост опухолей, индуцированных геном *src*. Поиски мишеней белка *pp60v-src* идут сейчас во многих лабораториях.

### Точка приложения активности

Один из способов узнать, на какие белки влияет белок *pp60v-src*, — определить, где именно в клетке он действует. Первые исследования указывали на то, что продукты вирусного онкогена локализируются в ядре клетки, где они могут непосредствен-

но воздействовать на аппарат, ответственный за репликацию клеточной ДНК, и таким образом побуждать клетку к неограниченному росту. Эксперименты, поставленные Х. Бейгом и Т. Графом (Научно-исследовательский институт вирусологии Макса Планка, Тюбинген), показали, что эффекты присутствия белка — продукта гена *src* можно обнаружить и в клетках, из которых удалено ядро. В дальнейшем поэтому никого не удивило, что в ядрах трансформированных клеток белок *pp60v-src* содержится, как выяснилось, в совсем малых количествах, а иногда и вовсе отсутствует. Большая часть этого белка связана с плазматической мембраной — тонкой пленкой, окружающей клетку, через нее клетка

взаимодействует с окружающей средой. Цитологи обсуждают вопрос о том, могут ли плазматическая мембрана и связанная с ней структуры контролировать рост клетки.

При исследовании мембран клеток, трансформированных геном *src*, было получено первое указание на связь между воздействием белка *pp60v-src* на определенный клеточный белок и характерными изменениями структуры и функций в раковых клетках. С помощью специальной методики микрофотосъемки Л. Роршнайдер (Центр по изучению рака Фреда Хатчинсона, Сизтл) продемонстрировал, что белок *pp60v-src* концентрируется в адгезивных бляшках — участках мембраны, которые прилипают к твердым поверхно-

стям. В раковых клетках адгезивные бляшки разрушены; вероятно, поэтому большинство раковых клеток легко отделяется от своей ткани и метастазирует в другие места.

Результаты Рорпнайдера позволили предположить, что белок *pp60v-src* разру-

шает адгезивные бляшки, фосфорилируя один или несколько входящих в них белков. Следуя этой гипотезе, Б. Сефтон и С. Сингер (Калифорнийский университет, Сан-Диего) показали, что белок *pp60v-src* фосфорилирует тирозин в винкалине — белке, входящем в состав нормальных ад-

гезивных бляшек. После трансформации этот белок распределяется по всей клетке. Логично предположить, что фосфорилирование винкалина обуславливает разрушение адгезивных бляшек, но, каково значение таких явлений в аномальном поведении раковых клеток, еще предстоит установить.

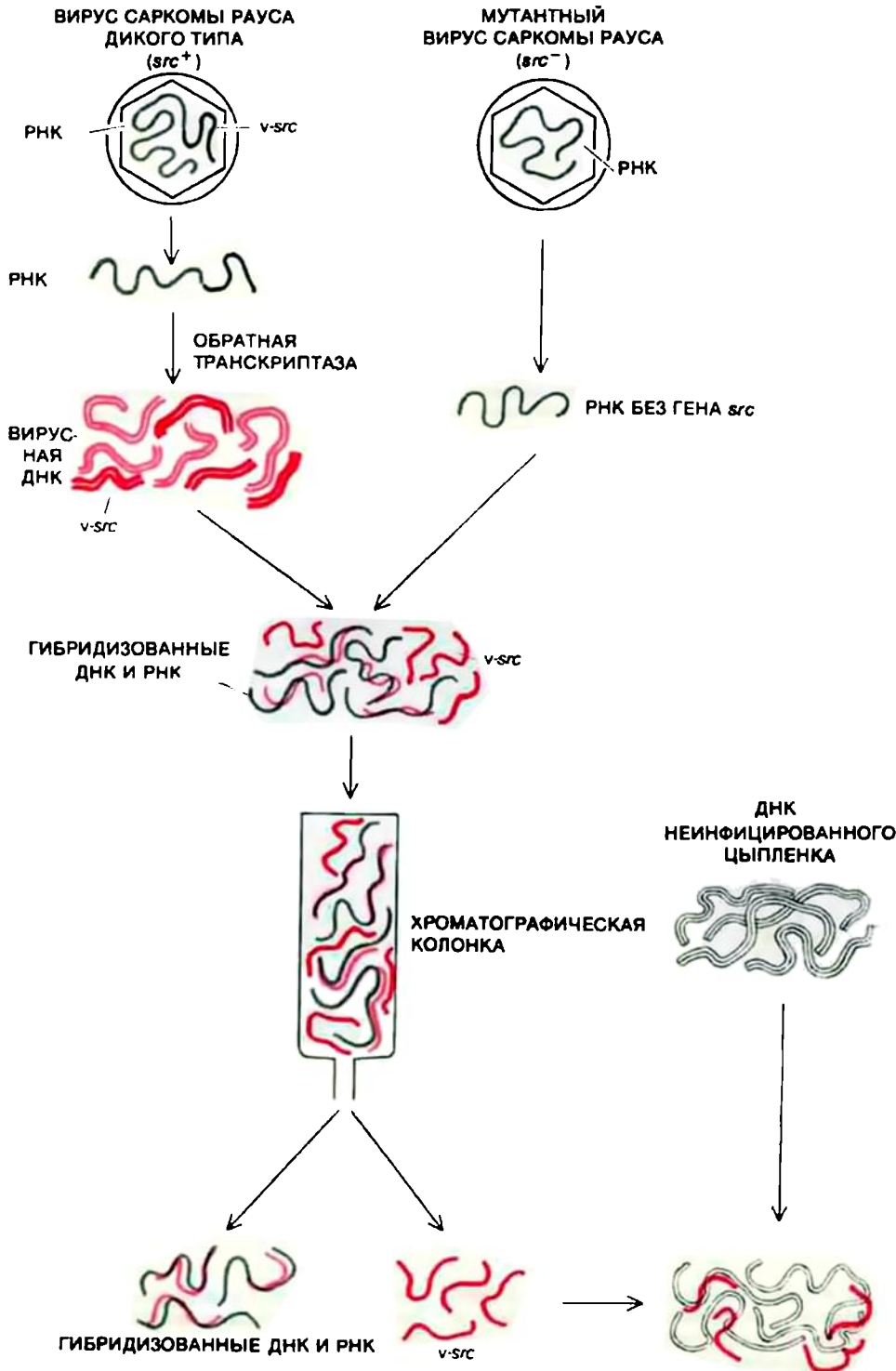
Раньше считалось, что онкогенный эффект — побочное проявление вирусных генов, основная функция которых — производить новые вирусные частицы. Сейчас известно, что и в отсутствие онкогенов репликация ретровирусов протекает нормально. Как же тогда объяснить, что онкогены так широко распространены в ретровирусах и сохраняются в ходе эволюции? Десять лет исследований потребовалось, прежде чем удалось получить ответ. Оказалось, что онкогены ретровирусов представляют собой просто клеточные гены в другом, так сказать, обличье — они перешли в вирусы от животных, в клетках которых вирусы реплицировались. Открытие онкогенов в самих клетках по своему значению далеко выходит за рамки вирусологии опухолей.

### Происхождение онкогенов

В 1972 г. Д. Стехелин, Г. Вармус и автор этой статьи начали изучать «гипотезу онкогена», которую предложили Р.Хьюбнер и Дж.Тодаро (Национальный институт рака). Пытаясь выяснить единый механизм индукции рака различными агентами, Хьюбнер и Тодаро предположили, что онкогены ретровирусов являются частью генетического багажа клетки и, вероятно, приобретены посредством вирусной инфекции на ранних этапах эволюции. Онкогены безвредны до тех пор, пока они находятся в состоянии покоя. Активированные каким-либо канцерогенным агентом, они могут превратить нормальную клетку в раковую. Мы решили, что, если гипотеза верна, нам удастся найти ген *src* в ДНК нормальных клеток.

ДНК позвоночных животных состоит из десятков тысяч генов. Чтобы найти среди них ген *src*, Стехелин применил очень эффективный прием: он взял радиоактивную ДНК, скопированную с гена *src* обратной транскриптазой (см. рисунок), и использовал ее как зонд для поиска клеточной ДНК с нуклеотидной последовательностью, похожей на последовательность гена *src*. Исследование провели методом молекулярной гибридизации, который состоит в том, что цепи нуклеиновых кислот (ДНК или РНК) гибридизуются, т.е. образуют комплексы с близко родственными нуклеиновыми кислотами. Нас очень воодушевило (и, пожалуй, удивило) известие о том, что копия гена *src*, полученная Стехелином, может гибридизоваться с ДНК из клеток неинфицированных цыплят и других птиц. Д. Спектор продолжила поиски ДНК, родственных гену *src*, у млекопитающих, в том числе у человека, и у рыб. Мы пришли к выводу, что ген, родственник гену *src*, имеется у всех позвоночных и, следовательно, гипотеза онкогена Хьюбнера — Тодаро близка к истине.

Однако при более глубоком изучении оказалось, что ген, который мы обнаружили у позвоночных, вовсе не является геном ретровирусов. Это клеточный ген, который сейчас называют ген *c-src*. Наиболее убеждает в этом то, что информация о структуре белка, закодированная в



РАДИОАКТИВНЫЙ ЗОНД для поиска гена *src* в нормальных клетках, который применил Д.Стехелин. Из вируса саркомы Рауса выделили РНК, несущую ген *v-src* (вверху слева). В присутствии радиоактивных предшественников ДНК с помощью обратной транскриптазы с нее получили ДНК. Образовавшиеся радиоактивные фрагменты ДНК (изображены цветными) денатурировали (разделили комплементарные цепи) и смешали с РНК, экстрагированной из мутантного вируса, не имеющего гена *v-src* (вверху справа). Одиночные цепи ДНК будут «гибридизоваться» с близкородственными им цепями ДНК или РНК. Большая часть радиоактивной ДНК образывала гибриды с РНК мутанта, но фрагменты с геном *src*, не найдя комплементарной РНК, не смогли гибридизоваться. Гибриды ДНК — РНК затем отделили при помощи хроматографии на колонке от негибридизованной *src*-ДНК и получили нужный радиоактивный зонд. Когда затем этот препарат смешали с нормальной ДНК цыплят, произошла гибридизация, выявив присутствие клеточных протоонкогенов, которые назвали *c-src* (внизу справа).



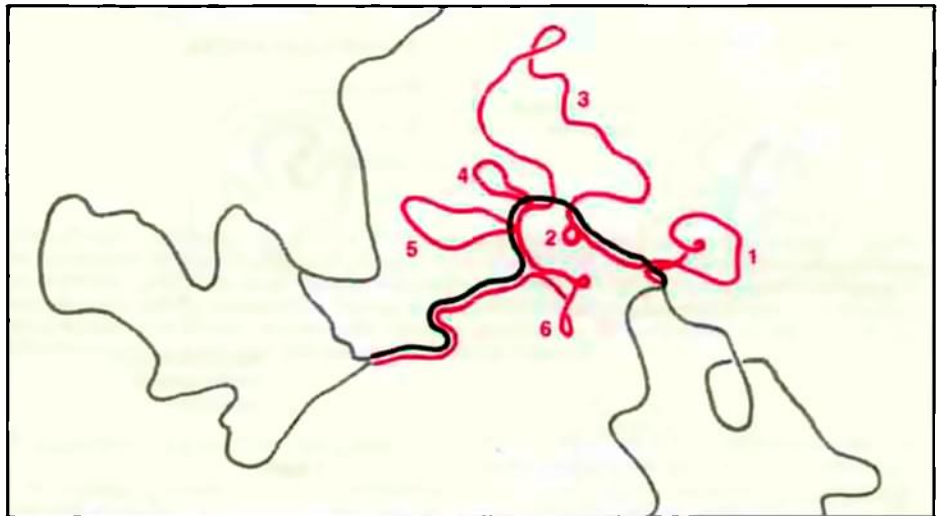
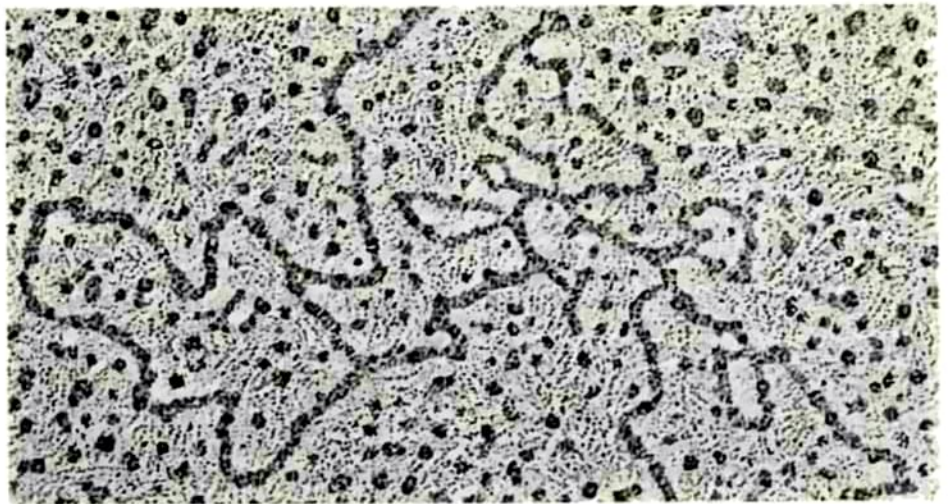
гене *c-src*, разделена на несколько участков, экзонов, которые перемежаются так называемыми интронами. Такая структура характерна для генов животных клеток, но не для генов ретровирусов. Если не считать интронов, варианты гена *c-src*, найденные у рыб, птиц и млекопитающих, очень похожи друг на друга и на вирусный ген *v-src*. Похоже, что ген *src* у позвоночных животных за всю долгую эволюцию сильно не изменялся, следовательно, этот ген важен для существования видов, у которых он встречается.

Проблема гена *c-src* стала еще загадочнее, когда обнаружили, что этот ген не просто присутствует в нормальных клетках, но активен в них, т.е. транскрибируется с образованием информационной РНК, а затем РНК транслируется с образованием белка. Молекулярная гибридизация с радиоактивной копией гена *v-src*, полученной Стехелином, выявила только РНК (анализировали клетки птиц и млекопитающих). Уловить белок оказалось труднее — в основном потому что в большинстве клеток он синтезируется в малом количестве. Успех пришел, когда мы и другие исследователи начали поиски клеточного белка с помощью антител, первоначально предназначенных для выявления вирусного белка рр60v-*src*. Клеточный белок, выделенный с помощью этих антител, практически неотличим от вирусного белка, поэтому его назвали рр60c-*src*. Эти два белка одинаковы по размерам и химической структуре: оба катализируют фосфорилирование тирозина, оба прочно связаны с плазматической мембраной клетки (трансформированных клеток в случае белка рр60v-*src*, нормальных клеток в случае рр60c-*src*). Такое впечатление, что оба белка предназначены для одной и той же цели, хотя один из них — вирусный белок, вызывающий рак, а другой — белок нормальных клеток.

### Клеточные онкогены

Данные, полученные при исследовании гена *src*, — первое указание на закономерность, общий характер и значение которой еще предстоит показать. Из 17 онкогенов ретровирусов, идентифицированных к настоящему времени, 16 имеют близких «родственников» в нормальных геномах позвоночных животных. Большинство этих клеточных онкогенов, как и ген *c-src*, по структурной организации ближе к клеточным, чем к вирусным генам; они тоже консервативны в эволюционном плане и проявляют активность в нормальных клетках. Пытаясь объяснить это, а также удивительное сходство между онкогенами ретровирусов и их «родственниками» из нормальных клеток, большинство вирусологов предлагают считать онкогены ретровирусов копиями клеточных генов. Возможно, онкогены когда-то были захвачены геномами предшественников ретровирусов, причем не так уж давно. Не известно, как и почему это произошло, но можно предположить, что копирование клеточных генов ретровирусами продолжается и сейчас, и, может быть, этот процесс удастся повторить в лабораторных условиях.

Гены позвоночных животных, от которых, очевидно, произошли онкогены ретровирусов, вначале называли протоонкогенами, чтобы подчеркнуть их эволюционное значение и избежать в названии впечатления, что клеточные гены сами об-



КЛЕТЧНЫЕ И ВИРУСНЫЕ ОНКОГЕНЫ. (Электронная микрофотография получена Р. Паркером.) Вирусную ДНК, несущую ген *src*, и ДНК цыпленка, несущую клеточный вариант того же гена, выделили и двухцепочечные ДНК подвергли денатурации. Затем создали условия для гибридизации образовавшихся одиночных цепей. Вирусный ген (на рисунке изображен черным цветом) и клеточный (изображен цветным) образовали гетеродуплекс. (Серым цветом изображена посторонняя ДНК, необходимая для контроля генов.) Петли на цепях клеточной ДНК представляют собой шесть интронов: эти последовательности перемежают экзоны, т.е. последовательности, кодирующие белок. Подобная структура характерна для многих клеточных генов, но не для генов ретровирусов. Такие электронные микрофотографии помогли установить, что онкогены имеют клеточное происхождение, а не занесены в клетку вирусами.

ладают онкогенным потенциалом. Сейчас ясно, что на самом деле они действительно имеют такой потенциал, т.е. являются клеточными онкогенами. Исследования, подтверждающие это, начались с вопроса: являются ли ретровирусные онкогены просто копиями генов из нормальных клеток и как объяснить разрушительное действие вирусных генов в инфицированных клетках. Были предложены два объяснения. По мутационной гипотезе отличия вирусных онкогенов от клеточных предков — небольшие, но существенные — возникли в результате мутаций, происходящих во время копирования клеточных генов с образованием геномов ретровирусов. Например, одинаковые на первый взгляд ферментативные активности белков рр60v-*src* и рр60c-*src*, возможно, имеют в клетке совсем различные мишени и, таким образом, по-разному влияют на ее функционирование. Гипотеза дозы гена предполагает, что онкогены ре-

тровирусов перегружают клетку по существу нормальными белками, выполняющими нормальные функции. С этой точки зрения развитие рака, вызванного онкогенами ретровирусов, больше зависит от количества вирусных белков, чем от каких-то их особых свойств.

Еще рано говорить о том, какая из двух гипотез верна, но есть указания в пользу гипотезы дозы гена. Во-первых, трансформирующий белок ретровирусов образуется, вне всякого сомнения, в очень большом количестве, т.е. его доза велика. Сигналы, направляющие активность генов ретровирусов, достаточно сильны, в результате вирусные онкогены продуцируют намного больше белка, чем соответствующий клеточный ген в норме; это вполне может разорить клетку. Более важные доказательства были получены при проверке основного предсказания гипотезы дозы гена: если онкогены ретровирусов и клеточные онкогены действительно иден-

тичны по своим функциям, можно подобрать условия, в которых клеточные гены сами вызывают злокачественный рост.

### Онкогенез клеточных генов

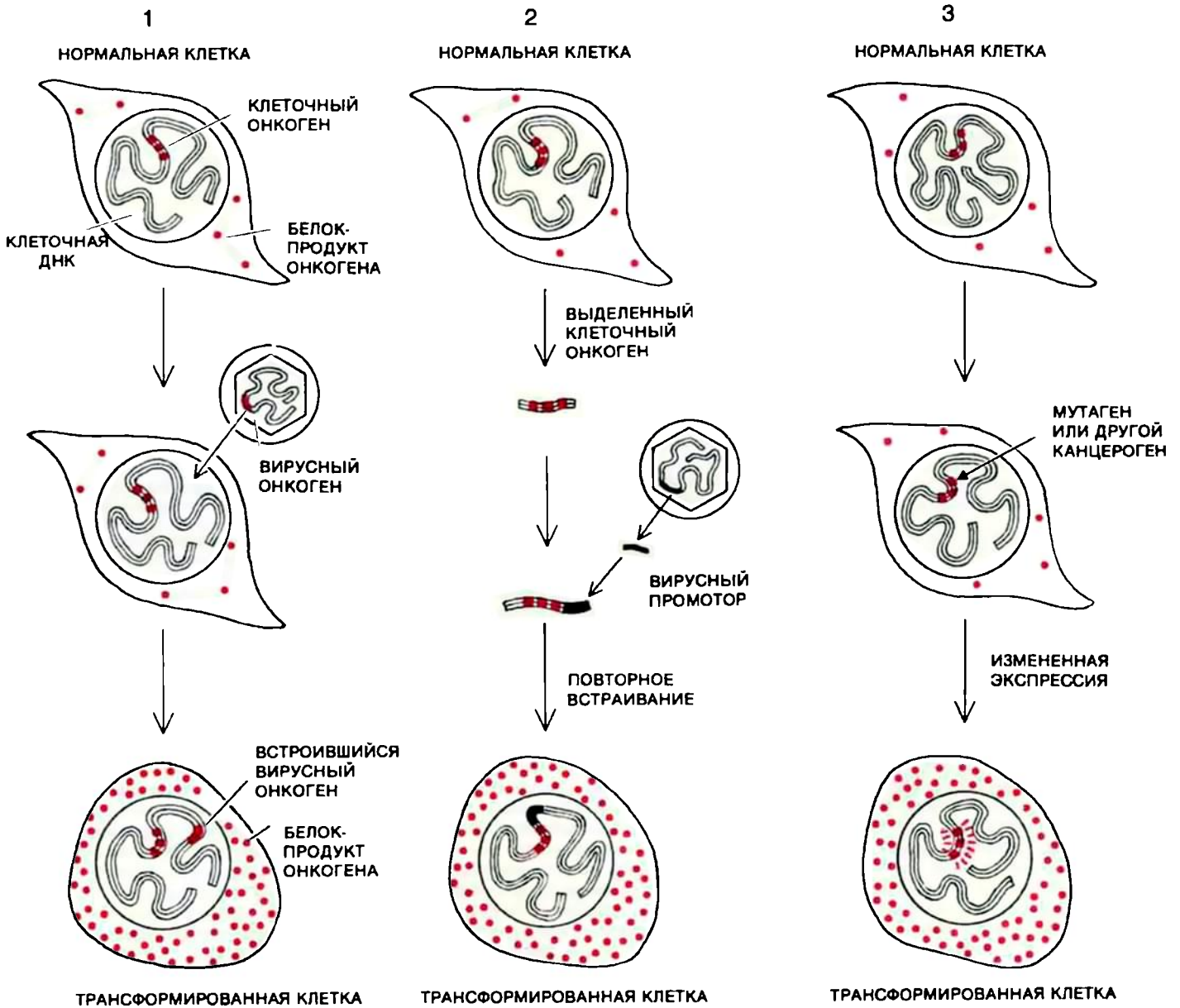
Впервые это предположение проверили в своих замечательных экспериментах Г. Ханафуза и его коллеги (Университет Рокфеллера). Ханафуза обнаружил штаммы вирусов саркомы Рауса с большими делециями в гене *src* и поэтому неспособные индуцировать характерную саркому у лабораторных животных. Когда Ханафуза ввел такие вирусы щиплятам, а затем выделил из инфицированных клеток вирусные частицы, он, к своему удивлению, обнаружил, что вирусный ген *v-src* реконструирован. Очевидно, ген *c-src* рекомбинировал с вирусным геном. Вирусы с реконструированным геном

снова могли вызывать опухоли, даже если три четверти генома было заимствовано из клеточного гена. Ханафузе удалось повторить свои замечательные эксперименты также на перепелках. Его результаты подтверждают, что функции генов *c-src* и *v-src* одинаковы. Однако многие вирусологи, занимающиеся опухолями, полагают, что нужны более прямые доказательства онкогенности клеточных генов.

Сейчас такие доказательства уже есть. В лабораториях Дж. Ванде Вуда и Э. Скольнича (Национальный институт рака), применив методы генетической инженерии, выделяли три клеточных онкогена (один из клеток мышей и два из клеток крыс) и прямо показали злокачественный рост культивируемых клеток. К клеточным генам присоединили вирусный «промотор» — участок вирусной ДНК, регу-

лирующий экспрессию близлежащих генов. Как и предсказывала гипотеза дозы гена, при введении в клетки комплекса *src*-промотор некоторые клетки трансформировались так же, как и под влиянием вирусного онкогена, хотя на самом деле они получили клеточный ген, который под влиянием вирусного промотора «работал» больше обычного. Более того, показано, что клетки, трансформированные клеточными онкогенами крыс, вырабатывали очень большие количества белка, закодированного в этих генах, тоже в полном соответствии с гипотезой дозы гена.

Почему же избыток нормального белка приводит к таким ужасным последствиям? На этот вопрос можно будет ответить уверенно, только когда установят роль клеточных онкогенов в нормальных клетках. Вполне вероятно, что клеточные



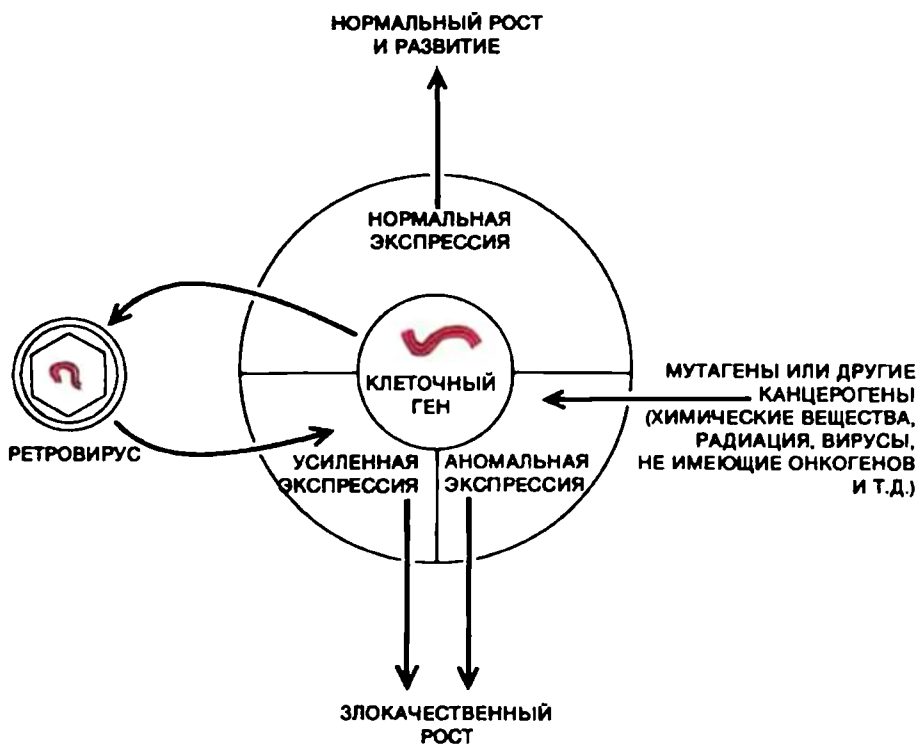
ГИПОТЕЗА ДОЗЫ ГЕНА утверждает, что клеточный онкоген задает синтез определенного количества нормального белкового продукта, необходимого для нормального роста клетки (верхний ряд), и что злокачественные изменения наступают в результате перепроизводства нормального белка. В случае инфицирования опухолевыми ретровирусами (1) избыточный синтез направляется вирусным онкогеном и контролируется вирусным геномом. Однако клеточный онкоген сам несет онкогенный потенциал, как продемонстрировали эксперименты с рекомбинантной ДНК (2). Если вирусный промотор присоединить к клеточному онкогену и

активированный таким образом ген вновь встроить в геном культивируемых клеток, можно получить синтез избыточного количества продукта онкогена и трансформацию клетки. Сходный процесс может объяснить злокачественный рост под влиянием других агентов помимо ретровирусов (3). Если клеточная ДНК так повреждена мутагеном или другим канцерогеном, что это каким-то образом усиливает активность клеточного онкогена, то продукт онкогена начинает продуцироваться в избытке, превращая нормальную клетку в злокачественную.

онкогены входят в тонко сбалансированную систему регуляции роста и развития нормальных клеток. Повышенная активность одного из генов системы может нарушать регуляцию и сдвигать состояние равновесия в сторону неограниченного роста.

Есть данные, что процессы, управляемые вирусными и клеточными онкогенами, действительно участвуют в контроле роста нормальных клеток. Прежде фосфорилирование тирозина белком *pp60<sup>v-src</sup>* считалось аномальным процессом, неестественность которого и лежит в основе злокачественного роста как реакции на ген *src*, однако эту точку зрения пришлось пересмотреть, когда С. Козн (Медицинская школа Университета Вакдербильта) показал, что фосфорилирование тирозина необходимо для жизнедеятельности нормальных клеток. Козн выделил и очистил «фактор роста эпидермиса» — небольшой белок, который при связывании с поверхностью клеток стимулирует синтез ДНК и деление клетки. Задавшись вопросом, как сигнал, инициирующий эти события, может передаваться с поверхности внутрь клетки, Козн сначала обнаружил, что связывание фактора роста эпидермиса с клетками вызывает фосфорилирование белков. Воодушевленный исследованиями белка *pp60<sup>v-src</sup>*, Козн в конце концов сумел показать, что под влиянием фактора роста эпидермиса специфически фосфорилируется тирозин.

В дальнейшем другие исследователи нашли, что некоторые белки, фосфорилирующиеся под действием фактора роста эпидермиса, могут фосфорилироваться и белком *pp60<sup>v-src</sup>*. Создается впечатление, что как нормальный стимулятор деления клетки (фактор роста эпидермиса), так и аномальный (белок *pp60<sup>v-src</sup>*) действуют единообразно. В таком случае фосфорилирование тирозина белком *pp60<sup>v-src</sup>* играет какую-то роль в регуляции роста нормальных клеток.



КОНЦЕПЦИЯ «РАКОВЫХ ГЕНОВ», подтверждаемая сведениями об онкогенах и другими предварительными данными, предлагает единое объяснение различных форм канцерогенеза. Центральная роль принадлежит группе клеточных генов, необходимых для нормального роста и развития. Попав в вирусный геном (слева), такие гены становятся онкогенами. Рак может возникнуть также в результате воздействия на клеточный ген различных мутагенов или других канцерогенов (справа).

**В поисках единой теории**

Вероятно, ретровирусы не являются главной причиной рака у человека; тем не менее они указали на механизмы возникновения болезни. Широко распространено мнение, что рак начинается с повреждения

ДНК, хотя, какова конкретная природа повреждения, неясно. Как же повреждение ДНК может вызвать злокачественный рост? Попытки ответить на этот вопрос так, чтобы объяснить все формы рака, породили концепцию «раковых генов». Раковые гены — это компоненты

ОНКОГЕН	ВИД—НОСИТЕЛЬ ОНКОГЕНА	ТИП ОПУХОЛИ	ПРОТООНКОГЕН В ДНК ПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ	ПРОДУКТ ОНКОГЕНА		РАСПОЛОЖЕН НА ПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЕ
				ПРОТЕИНКИНАЗА	ФОСФОРИЛИРУЕТ ТИРОЗИН	
<i>v-src</i>	ЦЫПЛЕНОК	САРКОМА	ЕСТЬ	ДА	ДА	ДА
<i>v-lps</i>	ЦЫПЛЕНОК	— " —	— " —	ДА	ДА	ДА
<i>v-yes</i>	ЦЫПЛЕНОК	— " —	— " —	ДА	ДА	?
<i>v-ros</i>	ЦЫПЛЕНОК	— " —	— " —	ДА	ДА	?
<i>v-myc</i>	ЦЫПЛЕНОК	САРКОМА, КАРЦИНОМА, ЛЕЙКЕМИЯ	— " —	?	?	?
<i>v-erb</i>	ЦЫПЛЕНОК	ЛЕЙКЕМИЯ, САРКОМА	— " —	?	?	?
<i>v-myb</i>	ЦЫПЛЕНОК	ЛЕЙКЕМИЯ	— " —	?	?	?
<i>v-rel</i>	ИНДЕЙКА	ЛИМФОМА	— " —	?	?	?
<i>v-mos</i>	МЫШЬ	САРКОМА	— " —	?	?	?
<i>v-bas</i>	МЫШЬ	САРКОМА	— " —	?	?	?
<i>v-abl</i>	МЫШЬ	ЛЕЙКЕМИЯ	— " —	ДА	ДА	ДА
<i>v-ras</i>	КРЫСА	САРКОМА, ЛЕЙКЕМИЯ	— " —	ДА	?	ДА
<i>v-fes</i>	КОШКА	САРКОМА	— " —	ДА	ДА	?
<i>v-fms</i>	КОШКА	— " —	— " —	ДА	?	?
<i>v-sis</i>	ОБЕЗЬЯНА	— " —	— " —	?	?	?

ОНКОГЕНЫ РЕТРОВИРУСОВ. Указаны вид животного, из клеток которого происходит данный онкоген, и тип опухоли, которую он индуцирует. Все 15 перечисленных онкогенов родственны одному протоонкогену, имеющемуся в ДНК позвоночных животных. Продуктами по меньшей мере 8 из них являются протеинкиназы, ферменты фосфорилирования. 6 из этих 8 киназ фосфорилируют тирозин, и по меньшей мере 4 фермента связываются с плазматической мембраной раковых клеток.

нормального клеточного генома, деятельность которых выходит из-под контроля или усиливается под действием различных канцерогенов и, таким образом, ответственна за аномальное поведение раковых клеток. Эта теория считает раковые гены не чужеродными, а нормальными, даже жизненно важными, но вышедшими из-под контроля; канцероген превращает, так сказать, друга во врага, повреждая либо непосредственно раковый ген, либо другой ген, который в нормальных условиях регулирует активность ракового гена.

Медики, собственно, уже давно имеют дело с эффектом раковых генов — известны семьи с наследственной предрасположенностью к некоторым определенным формам рака. Теперь же вирусологи, занимающиеся опухолями, столкнулись с раковыми генами сразу в виде клеточных онкогенов. В вирусах эти гены онкогенны; результаты Ван де Вуда и Скольникова свидетельствуют, что клеточные гены также могут трансформировать клетки. В таком случае легко представить себе, что раковые гены и клеточные онкогены, выявленные с помощью ретровирусов, одно и то же. Гипотезу онкогена изменили: главную роль в ней стали играть клеточные, а не вирусные гены; гипотеза дозы гена должна объяснить, почему повышенная активность нормального клеточного гена может стать причиной рака.

Данные в пользу этих предположений имеются в работах по изучению ретровирусов, индуцирующих у цыплят лимфому — летальную опухоль иммунной системы. Вирусы лимфомы цыплят не содержат онкогенов. Почему же они вызывают опухоли? У Хейворд и Б. Нил (Университет Рокфеллера) и С. Острин (Институт по изучению рака, Фокс-Чейс) обнаружили, что в опухолях, индуцированных вирусами лимфомы цыплят, вирусная ДНК почти всегда встроена в клеточную ДНК в непосредственной близости от клеточного онкогена (не *c-src*, а *c-myc*, открытого совсем недавно). Вероятно, вследствие этого экспрессия клеточного онкогена намного усилена. Эти данные хорошо вписываются в концепцию раковых генов. Включение ДНК вируса лимфомы в геном клетки-хозяина аналогично мутагенезу и другим повреждениям, вызываемым различными канцерогенами. Включение, очевидно, стимулирует активность гена, который является онкогеном (как *v-myc*) у различных ретровирусов цыплят; повышенная активность клеточного онкогена и служит, по меньшей мере отчасти, причиной возникновения опухолей. Ретровирусы, не имеющие онкогенов, индуцируют самые разнообразные опухоли; определяя место включения вирусного генома в клеточную ДНК, вирусологи, вероятно, смогут выявить раковые гены, которые не удалось идентифицировать другими способами.

Открытие раковых генов (в форме клеточных онкогенов) с помощью ретровирусов было счастливой случайностью. Должны ли исследователи быть довольны современными темпами выявления онкогенов в клетках? Очевидно, нет. Р. Вайнберг (Массачусетский технологический институт) и Дж. Купер (Гарвардская медицинская школа) расширили сферу поиска раковых генов за границы вирусологии опухолей. Они показали, что с кусочками ДНК длиной в один ген, выделенными из некоторых опухолей (не индуцированных

вирусами), может передаваться свойство злокачественного роста, если эти фрагменты вводят в нормальные культивируемые клетки.

Вайнберг и Купер, несомненно, нашли способ переносить активные раковые гены из одной клетки в другую. Эти исследователи располагают данными о том, что различные раковые гены проявляют активность в опухолях различных типов; их методика, вероятно, позволит значительно увеличить число раковых генов, доступных для изучения. Ни один из раковых генов, выявленных Вайнбергом и Купером, не имеет идентичного среди известных онкогенов. Тем не менее вполне вероятно, что все клеточные онкогены родственны друг другу. Если это действительно так, то в дальнейшем при изучении ретровирусов и в исследованиях по методу Вайнберга и Купера мы будем встречать сходные образцы — членов одного и того же большого семейства.

### Общий конечный путь

В виде раковых генов нормальные клетки несут потенциальный источник собственной гибели. Деятельность таких генов, возможно, и есть общий конечный путь воздействия многих канцерогенов. Раковые гены являются скорее всего не «незваными гостями», а, напротив, жизненно важными элементами генетического аппарата клетки, которые подводят клетку, только когда их структура или система контроля нарушается канцерогенами. По крайней мере некоторые из этих генов имеются в ретровирусах, где они легко доступны для идентификации и различных исследований.

Накопленные об онкогенах сведения лишь первый робкий взгляд за занавес, так долго скрывававший механизм рака. В какой-то степени то, что открылось, может обескуражить — ведь оказалось, что химические процессы, приводящие клетку к патологии, в принципе не отличаются от тех, что действуют в нормальной клетке. Это означает, что терапия рака останется такой же мучительной и длительной, как сейчас. Бесплезно изобретать средства, угнетающие процессы, которые приводят к злокачественному росту клеток, если те же самые процессы необходимы для их нормального существования.

Как бы ни завершилась история онкогенов, она поучительна для всех, кто исследует рак. Изучение вирусов, не имеющих, казалось бы, никакого отношения к человеку, вооружило исследователей мощными средствами изучения болезней человека. Вирусология опухолей потерпела неудачу, пытаясь обнаружить вирусных возбудителей рака человека, но в настоящее время главным является не вопрос, вызывают ли вирусы рак у человека (возможно, что в определенных ситуациях так может быть), — важнее с помощью вирусологии опухолей узнать как можно больше о механизмах злокачественного роста в человеческом организме.

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

Дж. Эллиот, П. Добер

### СИММЕТРИЯ В ФИЗИКЕ

В двух томах

Перевод с английского

Книга по теории групп и представлений групп, написанная физиками для физиков. Отличается простотой и ясностью изложения при достаточной математической строгости. В ней нет излишней абстрактности, характерной для книг такого рода, издававшихся ранее и написанных для физиков математиками. Математическое изложение теории групп занимает не более одной пятой объема двухтомной книги. Остальное — физические приложения, в первом томе простейшие, во втором — более сложные и более специальные. Физические приложения теории групп, собранные в самостоятельном курсе, позволяют восстановить у читателя утраченное из-за расчлененности физики по разделам ощущение единства физической науки, общности ее идей и методов. Книга открывает путь к углублению физической специализации при одновременном расширении физического кругозора. Будучи по характеру изложения доступна для студентов, по содержанию она удовлетворит аспирантов и научных работников (физиков и математиков) самой различной специализации. Каждый физик должен иметь книгу Дж. Эллиота и П. Добера на своей книжной полке.

1983 г., 602 страницы, с иллюстрациями  
Цена двух томов 3р. 45к.

Предварительные заказы на эту книгу принимает «Московский Дом книги». Его адрес: 121019, Москва, просп. Калинина, 26, п/я 42. Иногородным покупателям книга будет выслана наложенным платежом



# Древний греческий город в Центральной Азии

*Завоевание Персии Александром Македонским привело к возникновению на территории нынешнего Афганистана греческого государства. Последние 15 лет французская археологическая экспедиция вела раскопки Ай-Ханума, одного из городов этого государства*

ПОЛЬ БЕРНАР

**А**ЛЕКСАНДР МАКЕДОНСКИЙ (356 — 323 гг. до н.э.) вошел в историю как освободитель греческих городов Малой Азии, как завоеватель Египта и победитель Дария III, последнего правителя Персидской империи. Не столь известно, что, завоеывая древнеперсидское царство, он прошел на восток до Центральной Азии, в результате чего в долине Окса (нынешней Аму-Дарьи) возникло эллинистическое государство. В третьем и втором веках до нашей эры этот аванпост греческой цивилизации подчинял себе области, расположенные в настоящее время на территории Туркменской, Таджикской и Узбекской советских республик, а также Афганистана и Пакистана. Однако, кроме множества монет, которые свидетельствуют о сменявших друг друга греческих монархах, от этой цивилизации греческих колонистов, казалось, не сохранилось ничего. Некоторые ученые даже придумали для нее термин «греко-бактрийский мираж».

Конец такому скептическому отношению к эллинистической Бактрии положили раскопки древнего города в Афганистане у границы с Советским Союзом. Пятнадцатилетние изыскания французской археологической экспедиции в Ай-Хануме, раскопки остатков древнего города показали, что на протяжении двух столетий на берегах Окса, в 5 тысячах километров от колыбели греческой цивилизации, действительно процветало греческое государство.

Из горстки фактов, почерпнутых из упоминаний об этом центральноазиатском государстве в исторических источниках, известно, что до греческого завоевания оно было пограничной персидской провинцией. Через двадцать лет после смерти Александра Македонского эта часть его бывшей империи, простиравшаяся от Сирии до Гиндукуша и включавшая пограничную провинцию Бактрию, перешла под власть Селевка, соратника покойного завоевателя. Из «тысячи городов», которыми славилась Бактрия, найден пока только Ай-Ханум. Его основал либо сам Александр, либо — несколько позже — Селевк, который в 305 г. до н.э. принял титул царя.

В течение следующих пятидесяти лет Бактрия под властью Селевкидов сохраняла тесную связь с миром Средиземноморья. Приток поселенцев не только умножил греческое население провинции, но и усилил эллинистические компоненты ее

культуры. Около 250 г. до н.э., когда Селевкиды были заняты борьбой с соперниками на западе, Бактрия потихоньку отделилась и стала независимым царством. Вначале греко-бактрийское государство ограничивалось территориями по Оксу, но позже оно распространило свои границы к югу и в конце концов присоединило плодородные земли в верховьях долины Инда.

Хотя расширившееся таким образом эллинистическое государство процветало, ему постоянно угрожали кочевники, обитавшие у его северных пределов. Примерно в 145 г. до н.э. вторгшиеся кочевники изгнали греков из Ай-Ханума, и к 100 г. до н.э. вся эллинистическая Центральная Азия оказалась в руках новых завоевателей. Греческие поселения в верховьях Инда продержались еще несколько десятилетий, но затем пали и они. Таков был конец самого восточного крыла эллинизма.

**РАЗВАЛИНЫ** Ай-Ханума находятся на левом берегу Окса, у восточного края долины в среднем течении этой реки. Тут река прощается с горами и течет по первой относительно большой равнине, где в нее впадает река Кокча. Эта местность расположена далеко от наиболее известных переправ через Окс, а также от великого караванного пути в Индию, но она вполне подходит для военного аванпоста. Размещенный здесь гарнизон мог контролировать восточные пределы Бактрии и преграждать дорогу возможным захватчикам, которые решили бы двинуться на юг по берегу левого притока Окса выше по течению от города.

Равнина, простирающаяся по левому притоку Окса выше Ай-Ханума, имеет в ширину примерно 10 км, а в длину 35 км. Ее плодородные богатые лёссом земли, покрытые сетью оросительных каналов, использовались еще до основания города. А близость гор, куда можно было летом перегонять стада на новые пастбища, обеспечивала прекрасные условия для скотоводства, которым местные жители занимаются и по сей день. Горы, кроме того, изобилуют минералами. Например, копи в верхнем течении Кокчи были богатым источником драгоценной ляпислазуры.

Треугольник, образуемый слиянием Окса и Кокчи, отвечал всем требованиям греческих зодчих: «естественный акрополь», возвышающийся над окружающей местностью метров на 60, охраняет подступы

с востока, а крутые обрывы над обеими реками оберегают на юге и на западе этот участок, протянувшийся километра на два с юга на север и на полтора с востока на запад.

Переселенцы усилили эти естественные укрепления, окружив город стеной, тянувшейся по берегам обеих рек и поднимавшейся по склону акрополя. Вдоль северной окраины нижнего города, лишенной естественной защиты, стена была особенно мощной. Сложенная из необожженного кирпича, она достигала в высоту более 10 м при толщине 6 — 8 м. Массивные прямоугольные башни выдавались еще на 10 м. Перед этой частью стены был ров с отвесными стенками, мешавший придвинуть к ней осадные машины. И наконец, в юго-восточном углу акрополя находилась небольшая, но в буквальном смысле слова неприступная цитадель размером 100 на 150 м. С двух сторон ее защищал 80-метровый отвесный обрыв к Кокче, а с третьей — глубокий ров.

Жилые кварталы города и большинство общественных зданий располагались на нижней части территории; она была не так открыта ветрам, как акрополь, а из каналов на равнине туда легко было доставить воду. Нижний город строился вокруг дворца — комплекса монументальных зданий, в которых размещался административный аппарат города. Для того чтобы эти здания могли занять все удобное для застройки пространство, главную улицу провели по уступу у подножья акрополя. Эта улица шла от ворот на северной стене города до обрыва над Кокчей на юге. Благодаря такому расположению дворцовые здания смогли занять в южной части города участок размером 250 на 350 м. От дворца к главной улице вела изогнутая дорога. На их стыке стояли массивные укрепленные ворота с колоннадами.

**П**РИ ПОСТРОЙКЕ дворца греческие архитекторы взяли за образец резиденции персидских царей, которые им довелось увидеть во время завоевательных походов и которые были несвойственны собственно греческой архитектуре. Подобно дворцу Дария в Сузах, дворец в Ай-Хануме выполнял одновременно три функции: в нем размещались государственные учреждения, жилые покои и сокровищница. Большой парадный двор, обрамленный четырьмя портиками по 118 колонн с коринфскими капителями, имел



РАЗРУШЕННЫЕ СТЕНЫ дворцового комплекса в Ай-Хануме (вверху) хранят следы выбеленной глины, которой когда-то была покрыта кирпичная кладка. Это административные здания в углу участка площадью 9 гектаров.

ГЛАВНЫЙ ХРАМ (внизу) стоит на трехступенчатом подиуме чуть в стороне от главной улицы. Его толстые стены украшены глубокими нишами. Раннее утро. Туман поднимается с реки Окс.



размеры 137 на 108 м. За портиками на южной стороне двора вестибюль с тремя рядами колонн вел в самое сердце дворца. В юго-восточном углу дворцового комплекса располагались административные здания, наиболее интересным из которых было квадратное строение со стороной, равной 52 м. Внутри пересекающиеся под прямым углом коридоры разделяли его на две симметричные группы комнат. В восточной части здания находились два приемных зала, стены которых были украшены деревянными пилястрами; в западной соответствующие помещения были, по видимому, заняты канцеляриями. Небольшой двор с портиками из 60 колонн, построенный у западной границы дворцового комплекса, был рассчитан на менее официальную обстановку.

Юго-западную часть комплекса занимали три жилых здания. Их легко отличить от остальных строений, поскольку в каждом, кроме помещений для слуг, были ванны комнаты и передний дворик. Кладовые, построенные вокруг центрального дворика в западной части комплекса, служили сокровищницей. Планировка ее подсказана не эллинистической архитектурой. Найденные там сосуды и остатки их содержимого — жемчужины, неполированные и полированные куски агата, оникса, сердоликов, гранатов, ляпис-лазури, бериллов и горного хрусталя — указывают, что эти кладовые выполняли функцию сокровищницы.

Такой величественный ансамбль, занимающий почти 90000 квадратных метров, как-то не вяжется с представлением о глухой отдаленной провинции. Его размеры подкрепляют предположение, что это был царский дворец. Значит, Ай-Ханум был самостоятельной столицей и играл в восточной части Бактрии ту же роль, какая принадлежала знаменитому городу Бактры на западе страны. Подтверждается это и находкой бронзовых дисков, предназначавшихся для чеканки монет. Они указывают, что Ай-Ханум имел собственный монетный двор, а это прерогатива царей.

Кто там правил? Есть основания полагать, что последним владыкой был известный в истории царь Евкратид (170 — 145 г. до н.э.), который совершил несколько победоносных походов в северо-западную часть Индии. В таком случае сокровищница Ай-Ханума должна была некогда хранить груды индийских монет и другую ценную военную добычу. Свидетельством в пользу такого заключения служат несколько ваз, уцелевших в кладовых сокровищницы. Теперь они пусты, но сделанные чернилами греческие надписи на них показывают, что когда-то сюда ссыпали индийские и греческие монеты, после того как монеты эти были сосчитаны и число их записано в соответствующих документах. Вполне возможно, что Ай-Ханум — это именно тот город, которому Евкратид дал в свою честь новое название — Евкратидея (название это сохранилось в трудах древних авторов).

**КАК БЫ ТО НИ БЫЛО**, дворец и его грандиозные украшения показывают нам главные черты греко-бактрийской архитектуры — в том числе стены из кирпича-сырца (причем нижние ряды кладки иногда состоят из обожженного кирпича), равномерно покрытые слоем глины и выбеленные. Плоские крыши зданий носят типично восточный характер,

но орнаментальные полосы из терракотовых плиток придают им греческий вид. Цилиндрические каменные колонны и прямоугольные каменные пилястры создают тот же эллинистический эффект; при нехватке хорошего строительного

камня в Центральной Азии все это было большой роскошью. Каменщики Ай-Ханума, как на конвейере, вытесывали секции колонн и вырезали для них капители всех трех классических стилей — простые дорические, ионические с волю-



СЕРЕБРЯНАЯ БАКТРИЙСКАЯ МОНЕТА с головой царя Евкратиды (170 — 145 г. до н.э.) на аверсе и божественными близнецами Кастором и Поллуксом на реверсе. Греческая колония пала с концом царствования Евкратиды.

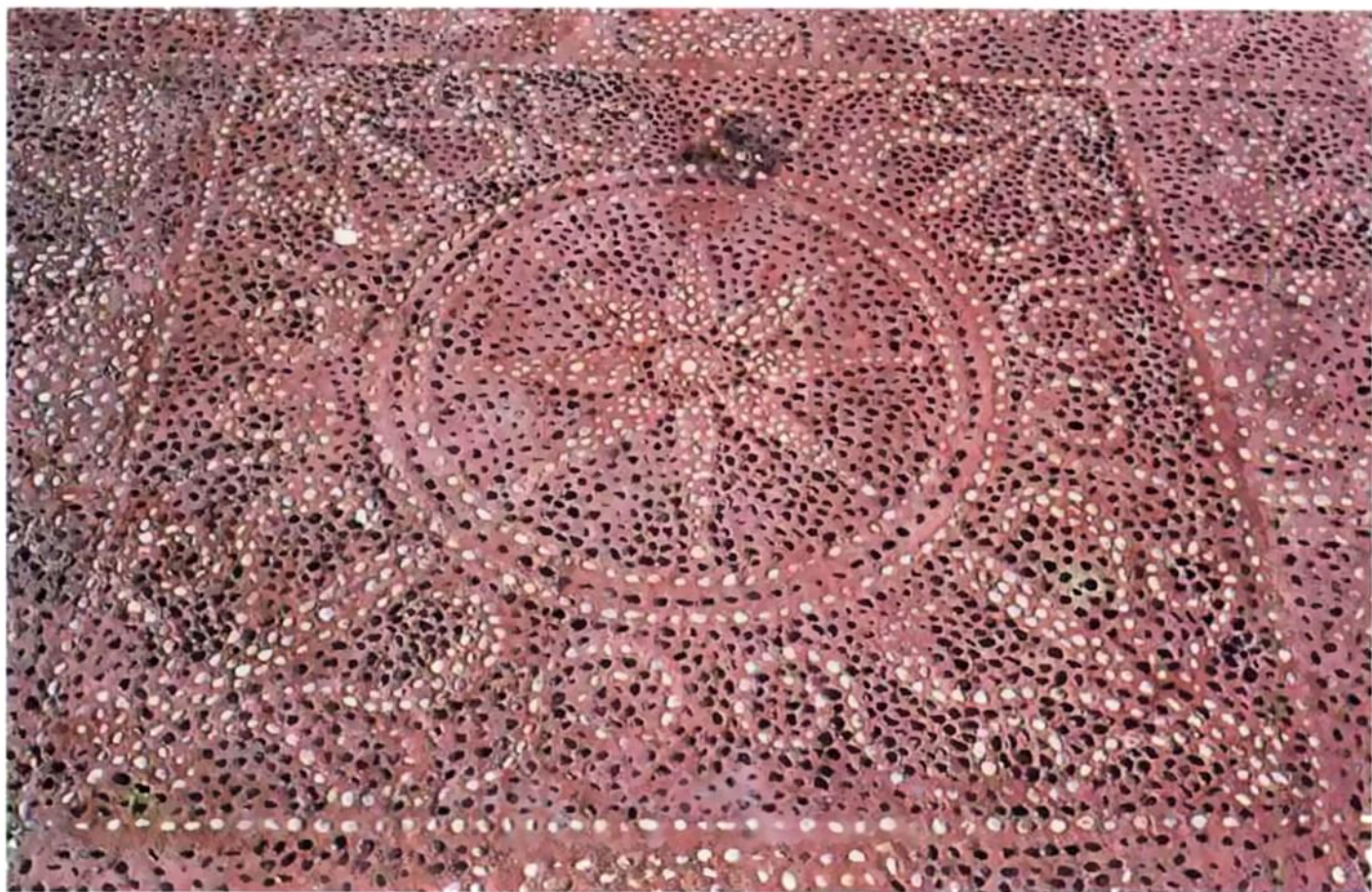


СТУПНЯ В САНДАЛИИ — один из немногих уцелевших обломков культовой статуи в главном храме. Обломков слишком мало для того, чтобы определить, была ли фигура мужской или женской.



СТЕНЫ ЗДАНИЯ, служившего жилищем представителю элиты, имеют в центре просвет для портала с колоннами. В подобных

домах (65 x 35 м) греческая традиция центрального двора уступила место переднему двору и центральному приемному залу.



ФОН МОЗАИЧНОГО ПОЛА в дворцовой бане сложился из темно-красной гальки, вделанной в цементную основу, а декоративные фигуры обрисовывались белой галькой. Как и подобает месту

омовений, многие из этих фигур изображали водных животных и мифических морских чудищ.



тами и коринфские с листьями. Колоссальные размеры дворца, его строго геометрический план и приверженность архитектора к симметрии — все вместе взятое создает ощущение несомненного, хотя и холодного, величия.

Значение Ай-Ханума подтверждается и характером других общественных зданий города. Особого внимания заслуживают три из них. Во-первых, гимнасий на берегу Окса. Надпись гласит, что, как было в обычае в Греции, этот центр обучения и физических тренировок находился под покровительством Гермеса и Геракла. Главное строение представляло собой квадрат со стороной 100 м и было по планировке типично греческим — ряд комнат и портиков вокруг центрального двора. В то же время как размеры, так и стройнейшая симметрия всех четырех сторон, каждая из которых имеет портал с колоннами и две длинные комнаты по бокам, демонстрируют подлинно греко-бактрийские новшества.

Второе внушительное сооружение, также типично греческое по планировке, — театр на внутреннем склоне акрополя. Его 35 ярусов разветвляются веером по полукругу с радиусом 42 м, а его вместимость, как полагают, около 6 тысяч зрителей, превосходит вместимость театра в Вавилоне — пока единственного другого театра эллинистического периода, обнаруженного на Среднем Востоке. Легкое восточное влияние заметно и в этом глубоко греческом учреждении: в середине ам-

фитеатра находились три просторные ложи — несомненно, почетные места, каких театры Греции практически не знали.

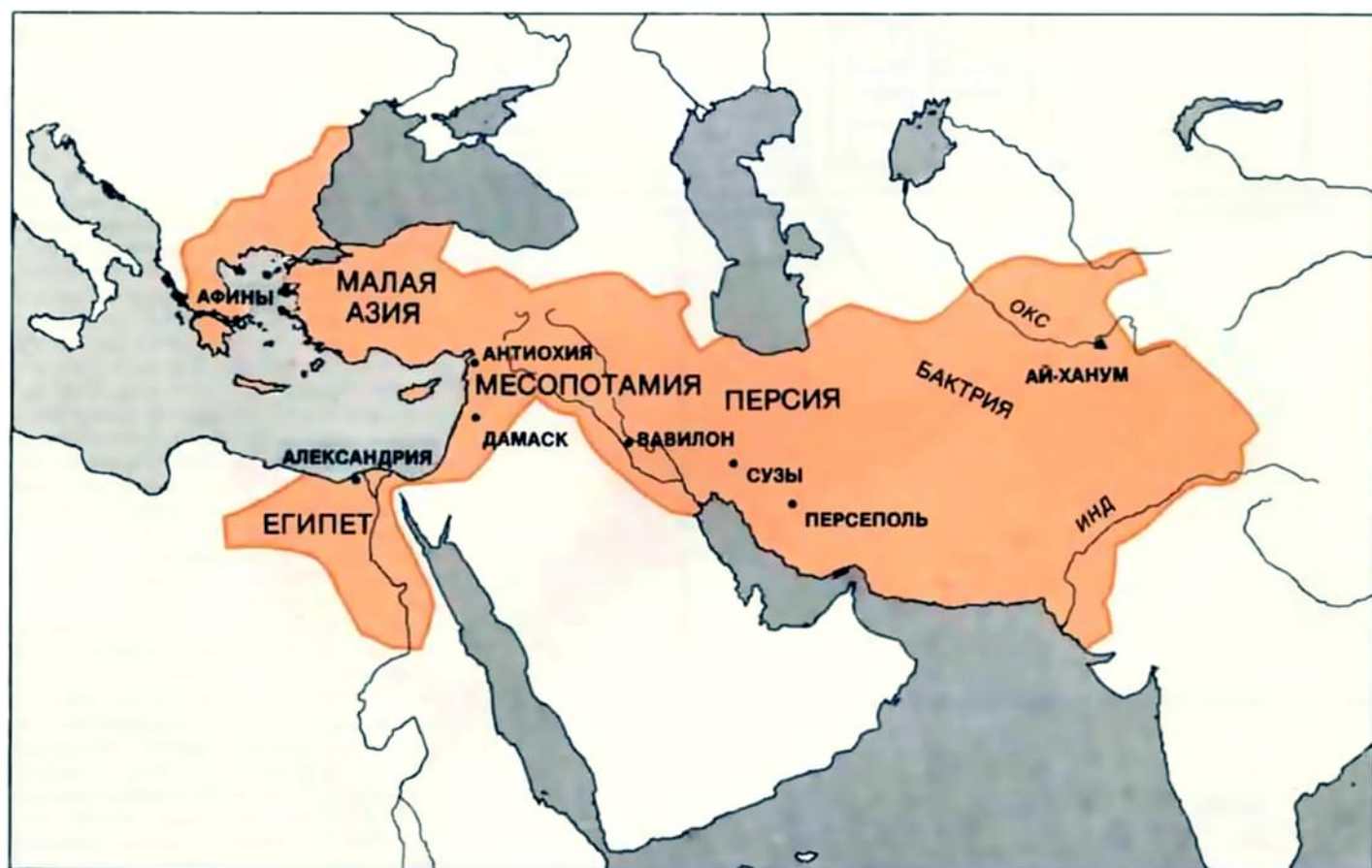
Третье из примечательных зданий, в отличие от первых двух, ничем не обязано эллинизму. Это арсенал — прямоугольное строение на главной улице города. В длину оно имело около 140 м, в ширину — около 100 м и состояло главным образом из ряда длинных кладовых, выходящих на большой центральный двор.

**ЛУЧШИЙ** жилой квартал города располагался в месте слияния двух рек. Дома были таких внушительных размеров, что на этом обширном участке их могло разместиться не более пятидесяти. Они строились с равным интервалом вдоль параллельных улиц, протянувшихся с востока на запад. Каждый дом был обращен фасадом на север, каждый имел портал с колоннами и передний двор и каждый занимал площадь размером 65 на 35 м. Если традиционный греческий дом планировался вокруг центрального двора, то в этих жилищах знати главным помещением был приемный зал. Он отделялся от остальных комнат, и особенно от помещений для слуг, подковообразной галереей. Двор, более уже не занимавший центрального положения, открывал доступ в зал, но не в рабочие помещения.

Элита Ай-Ханума, по-видимому, гордилась своими домашними банями, состоявшими из двух или, чаще, из трех помещений с оштукатуренными и выкра-

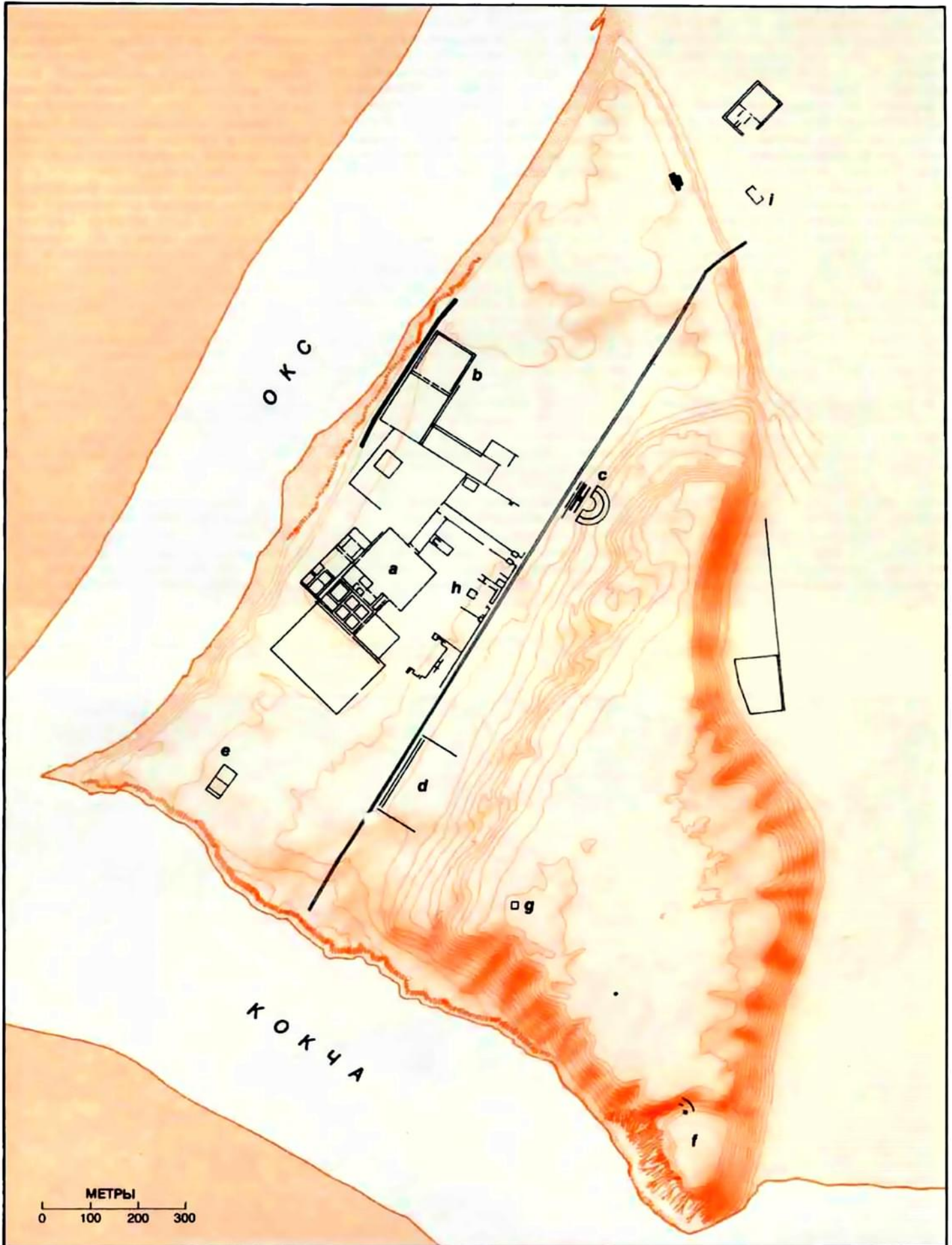
шенными красной краской стенами, с полами из каменных плит или цементными с мозаикой из гальки. (Полы в остальных комнатах были земляные.) Первое из трех помещений служило раздевальной. Второе — собственно баня; ничего похожего на ванну там не было, на моюшегося просто лили воду из большого сосуда. Воду, и холодную и горячую, приносили из третьего помещения. Нагревалась вода на печке в примыкавшей к нему кухне.

По греческому обычаю, покойников, как правило, хоронили за городскими стенами. У элиты были семейные мавзолеи со множеством склепов по сторонам центрального прохода. Колонистам, однако, был знаком и другой греческий обычай, согласно которому лиц, оказавших городу важную услугу, хоронили в пределах его стен. Это отличие было даровано двум гражданам, и их гробницы, небольшие копии храмов, находились неподалеку от входа во дворец. Более поздняя и более внушительная из них была со всех сторон окружена рядами каменных колонн. В более ранней и более скромной гробнице, фасад которой некогда украшали две простые деревянные колонны, был погребен некий Киней, один из отцов — основателей города. Перед ее порталом стояла каменная стела. Верхняя часть стелы исчезла, но на ее базе сохранились последние 5 из 130 изречений, начертанных в дельфийском храме Аполлона. Они формулируют добродетели идеального грека. «В детстве, — гласят эти изречения, — на-



ПОСЛЕ АЛЕКСАНДРА МАКЕДОНСКОГО ОСТАЛАСЬ эллинизированная империя, которая включала Малую Азию и Египет, а на востоке простиралась до Инда. Одной из самых далеких греческих колоний был город, называющийся теперь Ай-Ханум и по-

строенный на реке Окс после того, как Александр завоевал Бактрию — персидскую провинцию. Бактрия, первоначально входившая в ту часть империи, которой управлял Селевк, в 250 г. до н.э. стала независимым государством.



ГОРОД ЗАНИМАЛ УЧАСТОК примерно треугольной формы, лежащий выше по течению от места слияния рек Окс и Кокча, где естественный акрополь возвышается на 60 м над окружающей равниной. Главная улица тянулась от северных ворот по уступу вдоль подножья акрополя. Огромный дворцовый комплекс и значительная часть других зданий, принадлежавших элите, занима-

ли ровную площадку между улицей и левым берегом Окса. Отмечены: дворцовый комплекс *a*, гимнасий *b*, театр *c*, арсенал *d*, один из домов элиты *e*, цитадель на акрополе *i*, храмовая площадка под открытым небом там же *g*, храм на главной улице *h* и храм за северными воротами *l*.

учись благопристойным манерам; в юности научись управлять своими страстями; в зрелости научись справедливости; в старости научись быть мудрым советчиком; умри без сожалений». На исчезнувшей части стелы предположительно были вырезаны остальные изречения. Такая демонстрация их на столь почетном месте служит поразительным свидетельством того, насколько колонисты желали сохранить верность своему древнему наследию.

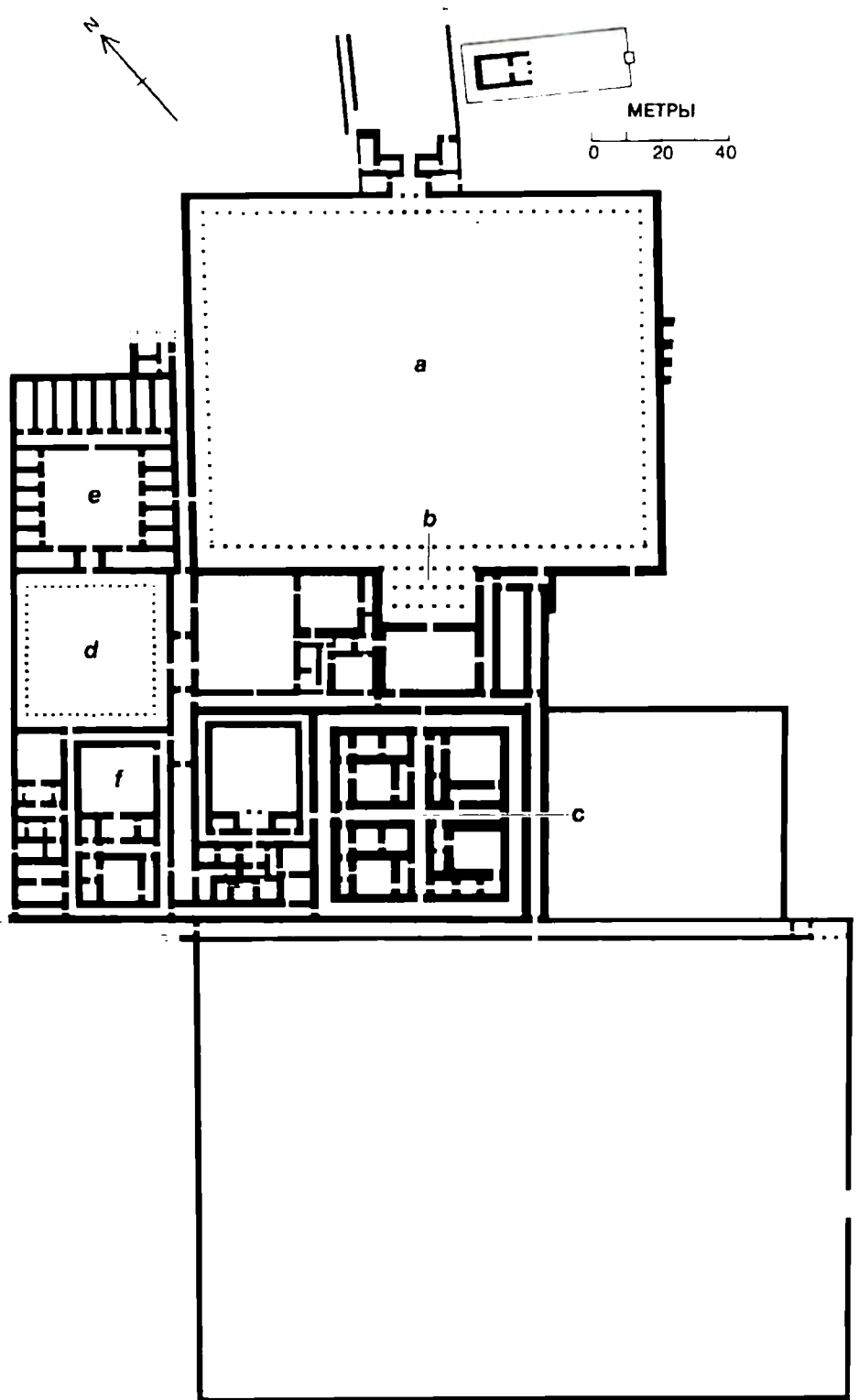
**В** РАЗВАЛИНАХ Ай-Ханума есть и другие доказательства этого желания. Например, при всей малочисленности найденных надписей они показывают, что поселенцы на протяжении всего двухсотлетнего их пребывания в Центральной Азии продолжали говорить и писать на правильном греческом языке. Даже в обоих типах использовавшегося письма — орнаментальном и скорописи — проявляется та же последовательность развития, что и на памятниках в самой Греции.

Другой пример этой преемственности культурных традиций был обнаружен в одной из кладовых сокровищницы, где, по-видимому, находилась библиотека. Некоторые папирусы как будто ускользнули от внимания завоевателей-кочевников. Хотя сами рукописи давным-давно превратились в пыль, чернила их строк кое-где отпечатались на земляном полу, что дало возможность расшифровать обрывки текстов. Они оказались частью текстов философского трактата из школы Аристотеля и фрагментами греческой поэмы. Таким образом, мы можем заключить, что обитатели дворца в лучших традициях эллинистической элиты читали философские труды и художественные произведения.

Эта находка подтверждает слова Плутарха, жившего несколько веков спустя, что после азиатского похода Александра обитатели восточных стран — по крайней мере правящая аристократия — читали Гомера, а их дети декламировали трагедии Софокла и Еврипида. Во всяком случае украшающая фонтан маска рабаповара, персонажа греческих комедий, наводит на мысль, что пьесы, исполнявшиеся в театре Ай-Ханума, принадлежали к греческому репертуару.

Из этого вовсе не следует, что все обитатели города были греческими поселенцами или их потомками. Многие имена в надписях греческие, но некоторые (например, Лисаний) типичны для Македонии, а еще некоторые — для других областей северной Греции, вроде имен Трибалла и того самого Кинея, чья гробница располагалась возле дворца. Среди писцов, работавших во дворце, были люди, носившие имена местного происхождения. Так, двое из них, Оксебок и Оксабаз, были названы в честь божества местной реки Окс. Очевидно, новые хозяева Бактрии сочли разумным сохранить местных чиновников, вымуштрованных бывшими правителями провинции. Можно с уверенностью предположить, что то же относилось и к людям более низких сословий. Многочисленные убогие однокомнатные жилища на акрополе могли принадлежать местным уроженцам, которым запрещалось селиться в нижнем городе.

**В** ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОМ искусстве колонисты сохраняли традиционные греческие вкусы, более того, они придерживались устаревшего классического стиля.



**ДВОРЦОВЫЙ КОМПЛЕКС** включал большой парадный двор *a* с вестибюлем *b*, который вел в административные здания. Наиболее примечательное из них квадратное строение *c*, симметрично разделенное внутри двумя пересекающимися под прямым углом коридорами, по-видимому, состояло из двух приемных залов справа и двух административных помещений слева. Двор поменьше *d* был рассчитан на менее официальную обстановку; по его сторонам находились сокровищница со множеством кладовых, выходящих в центральный дворик *e*, и жилые помещения *f* (показано одно из трех).



ОТПЕЧАТКИ ЧЕРНИЛ давно исчезнувшей греческой рукописи на земляном полу одной из кладовых дворцовой сокровищницы, где, возможно, помещалась библиотека. Этот и еще один такой же отпечаток помогли установить, что греческая элита читала поэтические и философские произведения.



СТРУЯ ФОНТАНА ИЗВЕРГАЛАСЬ ИЗ ТЕАТРАЛЬНОЙ МАСКИ; это традиционная маска раба-повара, одного из персонажей греческих комедий, которые, возможно, исполнялись в театре Ай-Ханума.

Например, мозаика выкладывалась из гальки, а не из отесанных каменных квадратиков, характерных более позднему стилю. Галька располагалась со значительными промежутками, причем чаще всего красноватые камешки составляли фон, а из белых складывались фигуры. В некоторых случаях для выразительности добавлялась черная галька. Мотивы мозаики были традиционными — цветы, дельфины, морские коньки и морские чудыша. Изображались эти фигуры плоско, без малейшей попытки создать ощущение объема или пространства.

То же можно сказать и о небольших скульптурных изображениях, которые удалось найти: женщина, опирающаяся на колонну, мужчина с венком из листьев на голове, барельеф юноши с накинутым на плечи плащом. Работа превосходна, но художественный подход традиционен. Тем не менее греко-бактрийским скульпторам следует отдать должное за одно новшество. Создавая большие статуи или настенные барельефы, они использовали прием, в Греции почти неизвестный: сначала возводили каркас из деревянных палок или свинцовых стержней, а затем покрывали его глиной или гипсом так, что получалась желаемая фигура.

Более заметно влияние Востока в культовых фигурах. Таковы, например, фигурки богинь, сделанные из терракоты или вырезанные из слоновой кости, — либо в одеждах и драгоценностях, либо обнаженных с весьма пышными формами. Позолоченное серебряное блюдо с изображением религиозной сцены также выявляет местные влияния: Кибела, греческая богиня природы, едет в запряженной львами колеснице, которой управляет еще одна традиционная греческая фигура — крылатая богиня победы. Изображены также два жреца, а в небе сияют солнце (антропоморфная фигура Гелиоса), луна и звезды. Иконографические элементы почти все греческие, но выполнил их художник в соответствии с восточными канонами. Композиция плоская, без малейших намеков на перспективу, а фигуры показаны либо анфас, либо в профиль.

Хотя официальные божества Бактрии — например, те, которые изображались на монетах — принадлежат греческому пантеону, три обнаруженные в Ай-Хануме храма не имеют в себе ничего греческого. Главный храм, построенный чуть в стороне от главной улицы, неподалеку от двора, представляет собой массивное квадратное здание на высоком трехступенчатом подиуме. Наружная стена украшена нишами, а широкий вестибюль ведет к небольшому помещению, в котором некогда стояла статуя божества. По сторонам этого помещения располагаются две узкие камеры. Архитектура эта ни в чем не отражает греческую традицию. Подиум взят из персидских и центральноазнатских образцов; план здания и его внешние украшения заимствованы из тех же двух источников и из Месопотамии. Сосуды для возлияний, зарытые у основания подиума, свидетельствуют о том, что ритуалы, исполнявшиеся в этом храме, не были эллинистическими. Хотя сохранилось несколько обломков культовой статуи, их слишком мало, чтобы определить, была ли это мужская или женская фигура. Отбитая ступня обута в греческую сандалию, так что этот бог (или богиня) мог иметь греческую внеш-

ность, но природа его, хотя бы отчасти, была, по всей вероятности, восточной.

Второй храм стоит за городской стеной неподалеку от северных ворот. Он очень похож на первый с той разницей, что вестибюль вел не к одному, а к трем культовым помещениям и не имел крыши. Третий храм также не эллинистический. Он представляет собой большую ступенчатую площадку в юго-восточном углу акрополя. Согласно греческим источникам, персы совершали богослужения под открытым небом на возвышенностях; это культовое сооружение на акрополе соответствует такой средневосточной модели.

**П**ОСЛЕ ТОГО как мы впервые отправились в Ай-Ханум в 1965 г., наши представления о том, что там можно найти, за пятнадцать лет раскопок претерпели радикальные изменения. Никто не рассчитывал найти в этом глухом уголке Центральной Азии город, который, несомненно, был богатой и могущественной столицей. Никто не предполагал, что греческие поселенцы, с одной стороны, почти во всех отношениях столь упорно хранили верность эллинистической культуре, а с другой — безоговорочно приняли восточные обычаи в архитектуре и религиозных обрядах.

Теперь накапливается все больше и больше очень серьезных данных о культуре доэллинистической Центральной Азии — например, благодаря открытиям в Алтыне (Советский Союз). Эти находки подкрепляют основной вывод, к которому мы пришли в нашей работе в Ай-Хануме. А именно: когда греки появились в тех краях, там уже существовала высоко развитая городская цивилизация с древними традициями монументальной архитектуры. И греческие колонисты на берегах Окса, прилагая всяческие усилия, чтобы сохранить свое культурное родство с греческим миром, одновременно готовы были воспринять уроки, полученные от местной цивилизации.



КОСТЯНАЯ ФИГУРКА, по-видимому изображавшая местную богиню, не несет никаких следов греческого художественного влияния. Местные влияния сказались и на архитектуре Ай-Ханума.

*Издательство*

**МИР**

*предлагает:*

*Р. Чинхолл*

**МУЗЕЙНАЯ  
КАТАЛОГИЗАЦИЯ  
И ЭВМ**

В двух томах

Перевод с английского

Единственное в мире издание, в котором обобщается опыт использования ЭВМ для учета, хранения и обработки информации о музейных коллекциях. В русском издании книга известного американского ученого дополнена материалами, отражающими последние достижения в рассматриваемой области.

Для работников музеев и органов охраны памятников старины.

1983, 15л. Цена 2р. 30к.

# Короткая жизнь Эвариста Галуа

Согласно легенде, молодой математик создал теорию групп за одну ночь — накануне дуэли, на которой он был смертельно ранен. Более тщательные исследования показывают, что разработка этих замечательных идей заняла у Галуа несколько больше времени

ТОНИ РОТМАН

**В** ПРЕДРАССВЕТНЫЕ часы 30 мая 1832 г. необыкновенно одаренный двадцатилетний математик Эварист Галуа писал своим друзьям Лебону и Делонз: «Меня вызвали на дуэль два патриота... Я не мог отказаться. Простите, что я не дал знать никому из вас. Противники взяли с меня честное слово, что я не предупредю никого из патриотов.

Ваша задача очень проста: вам надо подтвердить, что я дрался против воли, т.е. после того, как были исчерпаны все средства мирно уладить дело, и что я не способен лгать даже в таком пустяке, как тот, о котором шла речь.

Не забывайте меня! Ведь судьба не дала мне прожить столько, чтобы мое имя узнала родина.

Умираю Вашим другом.

Э. Галуа».

В ту же ночь Галуа написал своему другу Огюсту Шевалье:

«Я открыл в анализе кое-что новое. Некоторые из этих открытий касаются теории уравнений, другие — функции, определяемых интегралами.

В теории уравнений я исследовал, в каких случаях уравнения разрешаются в радикалах, что дало мне повод углубить эту теорию и описать все возможные преобразования уравнения, допустимые даже тогда, когда оно не решается в радикалах.

Из этого можно сделать три мемуара...

Обратись публично к Якоби и Гауссу и попроси их высказать свое мнение, но не о верности теорем, а об их значении.

Я надеюсь, что после этого найдутся люди, которые сочтут для себя полезным навести порядок во всей этой неразберихе».

В свете последующих событий становится понятным состояние отчаяния, в котором Галуа писал эти письма. Ранним утром, закончив писать, он покинул свою комнату в парижской частной лечебнице Фолтрне и направился к находившемуся поблизости пруду, где ему предстояла дуэль с неким политическим активистом Пеше д'Эрбенвилем. Галуа ранили в живот и бросили на месте дуэли. Его нашел прохожий и перевез в больницу Кошэн, где он умер на следующий день. Четырнадцать лет спустя рукописи, которые Галуа оставил для Шевалье, опубликовал французский математик Жозеф Лиувилль. Эти статьи положили начало необыкновенно плодотворной ветви математики, названной теорией групп.

**Н**ЕМНОГО найдется в истории науки легенд, которые по своей романтичности могли бы сравниться с тем, что рассказывается о жизни и смерти Галуа. История его жизни так впечатляет, что очень легко прочесть слишком много между строк его писем. Хотелось бы на-

конец разобраться в событиях, приведших Галуа к дуэли, чтобы пролить свет на драму, отразившуюся в письмах.

Известно, например, что в семнадцать лет Галуа много сделал для создания раздела математики, который ныне дает возможность проникнуть в сущность таких различных областей, как теория чисел, кристаллография, физика элементарных частиц и возможные позиции кубика Рубика. Известно и то, что в том же возрасте Галуа вторично провалился на экзамене по математике при поступлении в Эколь Политехник (Политехнический институт). Ему пришлось поступить в Эколь Нормаль (Высшую педагогическую школу), но в девятнадцать лет он был оттуда исключен, дважды арестован и заключен в тюрьму за политическую деятельность. Незадолго до дуэли он пережил разочарование в любви; в одном из своих последних писем он, по-видимому, связывает это с дуэлью. «Я умираю, — писал он, — жертвой подлой кокетки».

К сожалению, в XX в. некоторые биографы Галуа не устояли перед искушением по-своему сопоставить, интерпретировать и приукрасить подобные факты. История жизни Галуа известна в основном по популярным его биографиям, таким, как книга физика Леопольда Инфельда и астронома Фреда Хойла. Наиболее распространенная версия этой истории принадлежит математику Эрику Темплу Беллу, чья книга «Творцы математики», вышедшая в 1937 г., пожалуй, самое известное описание жизни великих математиков.

В популярном изложении Галуа предстает как непонятый гений, угнетенный глупостью учителей, неизвестный в математических кругах своего времени и побуждаемый происходившими вокруг него событиями к политической деятельности, на которую уходила его энергия и которая в конечном счете привела его к гибели. Согласно таким жизнеописаниям, самым примечательным было то, что в смутное время политических беспорядков и даже в тюрьме Галуа продолжал обдумывать свои математические идеи и наконец в ночь перед дуэлью записал их. Стоит привести здесь описание этой последней ночи, данное Беллом, поскольку именно оно, по-видимому, более всего способствовало распространению мифа о Галуа:

«Всю ночь напролет он лихорадочно делал наброски своего научного завещания, тщательно собирая по частицам сокровища своего ума; писал, стараясь все успеть перед смертью, неотвратимость которой была ему очевидна. Снова и снова он принимался царапать на полях: «У меня нет времени, у меня нет времени», — и переходил к следующей мысли. То, что он написал в эти последние полные отчаяния

часы перед рассветом, даст пищу для размышления поколениям математиков на сотни лет».

Недавно с помощью М. Энно и С. Де-Витт-Моретт (Техасский университет, Остин) я изучил некоторые рукописи Галуа, а также последние научные работы о его жизни, показывающие, что основные факты его биографии известны давно. Воссозданная же Беллом и другими картина жизни Галуа дает нам скорее стереотип гения науки, аеллирующий к воображению массового читателя, чем представление о реальной личности Галуа. Подлинная история жизни Эвариста Галуа увлекательна сама по себе и вполне заслуживает того, чтобы ее рассказать в 150-ю годовщину его смерти.

**П**ОМИМО писем, официальных записей и других документов того времени основным источником сведений о жизни Галуа является биография, написанная в 1896 г. Полем Дюпюи, историком и старшим надзирателем Эколь Нормаль, в которой Галуа учился за 66 лет до него. Согласно книге Дюпюи, Галуа родился 25 октября 1811 г. в городе Бур-ла-Рен близ Парижа. Его отец Никола Габриэль Галуа был сторонником Наполеона и возглавлял либеральную партию своего городка; он был избран мэром Бур-ла-Рена в 1815 г. во время наполеоновских Ста дней.

До 12 лет Эвариста воспитывала мать, Аделаида Мария Демант Галуа. Она передала сыну солидные познания в греческом и латинском языках и свой скептицизм по отношению к господствующей религии. Маловероятно, однако, чтобы юный Галуа мог познакомиться с математикой в объеме, большем чем обычные уроки арифметики; математическое образование в то время не считалось чем-то важным. Неизвестно, имел ли кто-нибудь еще в семье Галуа способности к математике.

Официально обучение Галуа началось в 1823 г., когда он поступил в Королевский лицей Людовика Великого (лицей Луиле-Гран), парижскую подготовительную школу, в которой в свое время учились Робеспьер и Виктор Гюго (эта школа существует и по сей день). В лицее сформировались политические взгляды Галуа. Либеральные, антироялистские симпатии, переданные ему родителями, совпали с политическими взглядами большинства лицейцев.

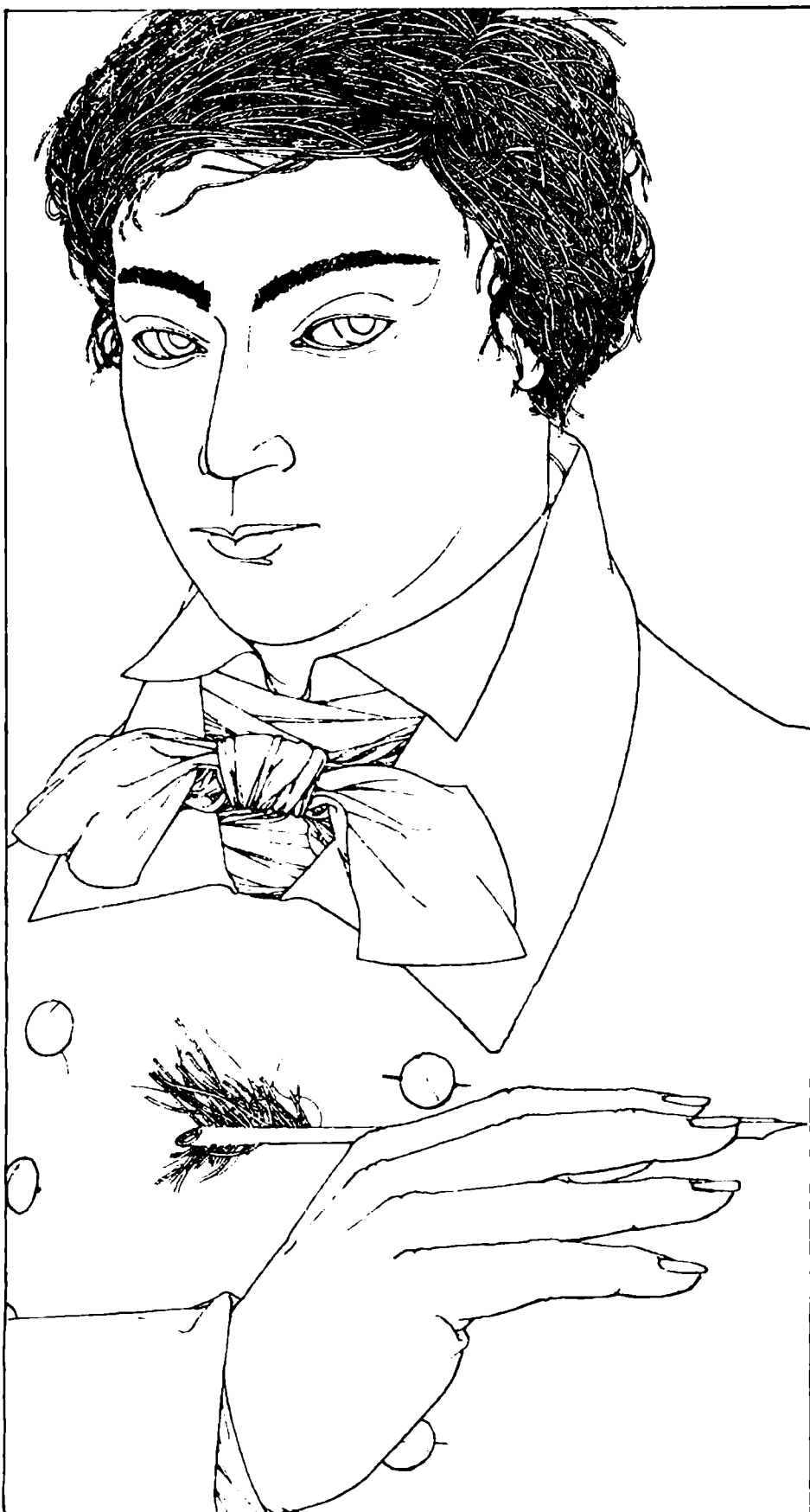
В первый год пребывания Галуа в лицее отношения между лицейцами и вновь назначенным директором школы были весьма натянутыми. Лицейсты подозревали директора в намерении отдать школу иезуитам (иезуиты возглавляли правое крыло реакции, которая пришла на смену наполеоновской эпохе). Ученики доступны-

ми им средствами выражали свой протест: отказывались петь в церкви, отвечать в классе, провозглашать тост за здоровье Людовика XVIII на школьных банкетах. Директор исключил сразу 40 учеников как зачинщиков. Хотя Галуа и не исключили (и неизвестно, принимал ли он участие во всем этом), произвол директора, несомненно, усилил недоверие Галуа к властям.

**П**ОЧТИ нет свидетельств того, что Галуа был плохим учеником или что низкий уровень преподавания в лицее сдерживал его интеллектуальное развитие, как следует из некоторых популярных книг. В первые годы обучения он завоевал несколько наград по греческому и латыни и получил полдюжины хвалебных отзывов. Историк науки Р. Татон называет его успехи блестящими. Правда, на третьем курсе лица Галуа недостаточно хорошо занимался по классу риторики, и его оставили на второй год. Белл утверждает, что Галуа пренебрегал риторикой из-за чрезмерных занятий алгеброй, однако он записался в класс математики уже после того, как был оставлен на второй год. Галуа было тогда 15 лет. Занятия в этом классе, которые вел Ипполит Жан Вернье, пробудили в Галуа его математический гений. Без труда освоив учебную программу, он сразу взялся за работы выдающихся ученых того времени, с увлечением изучил книгу геометра Лежандра и труды Лагранжа: «Решение алгебраических уравнений», «Теория аналитических функций» и «Лекции по дифференциальному исчислению». Несомненно, именно у Лагранжа Галуа впервые встретился с теорией уравнений, в которую в течение следующих четырех лет он сделал фундаментальный вклад. По-видимому, Вернье по достоинству оценил талант своего ученика: в отзыве на отчет Галуа за триместр он пишет о «старании и успехе», «старании и очень заметном прогрессе» и т. п.

Открыв для себя мир математики, Галуа сильно переменился. Он стал небрежно относиться к занятиям по другим предметам, чем вызвал враждебное к себе отношение учителей по гуманитарным наукам. Преподаватели риторики называют его рассеянным, в отчете за триместр и в отзывах появляются слова «замкнутый», «странный», «своеобразный». Даже Вернье, который не стремился охладить страсть Галуа к математике, советовал ему заниматься более систематически. Галуа не последовал его совету: он решил держать вступительный экзамен в Политехнический институт на год раньше и без обычного подготовительного курса по математике. И провалился, так как недостаточно глубоко знал основы математики.

**Г**АЛУА считал, что с ним обошлись несправедливо, провал еще более настроил его против властей. Тем не менее быстрые успехи в математике продолжаются, и Галуа записывается в лицее в математический класс более высокого уровня, который вел очень опытный преподаватель Луи Поль Эмиль Ришар. Ришар сразу понял, как одарен Галуа, и обратился с просьбой о его приеме в Политехнический институт без экзаменов. Хотя эта просьба не возымела последствий, одобрение Ришара оказало на юношу чудесное влияние. В марте 1829 г., когда Га-



ГАЛУА в 17 лет, студент лицея Луи-ле-Гран. (Рисунок Д. Джонсона.) Начав изучать математику, Галуа уже через два года опубликовал статью о непрерывных дробях и приступил к исследованию теории уравнений, что привело его к абстрактной алгебраической теории множеств объектов, которые он назвал группами. Теорию групп развивали также многие другие математики конца XVIII — начала XIX в., а именно Паоло Руффини, Нильс Хенрик Абель и Жозеф Луи Лагранж. Честь основания теории групп, однако, обычно приписывается Галуа. Рисунок выполнен по двум известным портретам Галуа. Один был сделан, когда Галуа было 15 лет, а другой закончен по памяти братом Галуа Альфредом в 1848 г., через 16 лет после смерти Эвариста.

ainsi  $F = \psi V$ , et l'on aura  
 $\psi V = \psi V' = \psi V'' = \dots = \psi V^{(n)}$   
 La valeur de  $V'$  pourra donc se déterminer aisément.  
 2°. Réciproquement, et une fonction  $f$  est dite  
 mesurable rationnellement, si que l'on pose  $L = \psi V$ ,  
 on sera avoir

$$\psi V = \psi V' = \psi V'' = \dots = \psi V^{(n)}$$

puisque l'équation en  $V''$  a pas de racines communes  
 celle et que  $V$  satisfait à l'équation rationnelle  $F = \psi V$ ,  
 l'est une quantité rationnelle. Donc la fonction  $f$   
 sera nécessairement invariable par les substitutions  
 du groupe éci-dessus.

Ainsi ce groupe joint de la double propriété éci-dessus  
 s'agit dans le théorème précédent proposé. Le  
 théorème est donc démontré.

On appelle groupe de l'équation le groupe en question.  
 Soient. Il est évident que dans le groupe de permutations  
 dont il s'agit ici, la dérivée des lettres n'est point  
 à considérer, mais seulement les substitutions de lettres  
 par les quelles on passe d'une permutation à l'autre.  
 Ainsi l'on peut se donner arbitrairement la première  
 permutation, et les autres substitutions permutations  
 s'en déduisent pour toujours par les mêmes substitutions  
 de lettres. Le nouveau groupe ainsi formé jouira éci-  
 dessus des mêmes propriétés que le premier, puisque  
 dans le théorème précédent, il ne s'agit que des  
 substitutions que de lettres que l'on peut faire dans les  
 fonctions.



Caractéristiques d'un groupe. On peut parler  
 d'un groupe d'opérations quelconques d'un groupe  
 Soient. Les substitutions sont indépendantes  
 même de variables de lettres



PROPOSITION II.

Théorème. Si l'on adjoint à une équation donnée d'une  
 équation auxiliaire irréductible ~~à coefficients~~ il  
 arrivera de deux choses l'une: ou bien le groupe de l'équation  
 ne sera pas changé; ou bien il se partagera en  
 p groupes appartenant à l'équation proposée séparément  
 quand on lui adjoint chacun des racines de  
 l'équation auxiliaire. 2°. ces groupes jouiront de la  
 propriété remarquable que l'on pourra de l'un à l'autre  
 en opérant dans toutes les permutations de racines avec  
 même substitution de lettres.

1°. Si, après l'adjonction de  $r$ , l'équation en  $V$  éci-dessus  
 est restée plus haut irréductible, il est clair que  
 le groupe de l'équation ne sera pas changé. Si au contraire  
 elle se résout, alors l'équation en  $V$  se décomposera en

$$f(V, r) \times f(V, r') \times f(V, r'') \times \dots$$

où  $r, r', r'', \dots$  sont les racines de l'équation.  
 Ainsi le groupe de l'équation proposée se décomposera  
 en p groupes chacun d'un même nombre de  
 permutations, puisqu'à chaque valeur de  $V$  correspond  
 une permutation. Ces groupes sont séparément liés  
 de l'équation proposée, quand on lui adjoint successivement  
 $r, r', r'', \dots$

Il y a quelques cas à compléter dans cette  
 éci-dessus. Note de l'auteur.  
 car si l'on éci-dessus  $n$  racines  $f(V, r) = 0$  et  $F = 0$   
 on peut arriver  
 que si deux des racines de l'éci-dessus de l'équation  
 sont de même degré en  $V$  et  $f(V, r)$ , on est en  
 plus grand.



луа был еще студентом, вышла его первая статья. Она называлась «Доказательство одной теоремы о периодических непрерывных дробях» и появилась в журнале *Annales de mathématiques pures et appliquées*, который издавал Жозеф Дняз Жергон.

Однако тема статьи была в стороне от главных научных интересов Галуа. В то время он уже обратился к теории алгебраических уравнений, которую начал изучать по трудам Лагранжа. В возрасте 17 лет Галуа взялся за одну из самых трудных в математике проблем, которая сто с лишним лет завалила ученых в тупик.

В 1829 г. центральной проблемой теории уравнений был вопрос, при каких условиях алгебраическое уравнение можно разрешить. Точнее, каким должен быть метод решения уравнения с одним неизвестным  $x$ , все коэффициенты которого являются рациональными числами, причем член высшей степени равен  $x^n$ ? Метод должен быть общим и применяться ко всем подобным уравнениям и должен включать лишь четыре элементарные операции (сложение, вычитание, умножение и деление) и операцию извлечения корня. Если решения (корни) уравнения можно получить из коэффициентов уравнения только при помощи этих операций, то говорят, что уравнение разрешимо в радикалах.

Накопленный опыт как будто подсказывал, что решение уравнения  $n$ -й степени не требует более сложных операций, чем извлечение корня  $n$ -й степени. Решение квадратного уравнения общего вида или уравнения второй степени  $ax^2 + bx + c = 0$ , известное еще вавилонянам, требует извлечения квадратного корня из некоторой комбинации коэффициентов, а именно из выражения  $b^2 - 4ac$ . Таким образом, общее квадратное уравнение разрешимо в радикалах. Точно так же общее решение кубического уравнения, которое нашли в начале XVI в. итальянские математики Сципион дель Ферро и Никколо Фонтана (Тарталья), сводится к извлечению кубического корня из некоторой комбинации коэффициентов. Решение уравнения четвертой степени общего вида, впервые полученное итальянским математиком Лудовико Феррари примерно в то же время, требует извлечения корней четвертой степени.

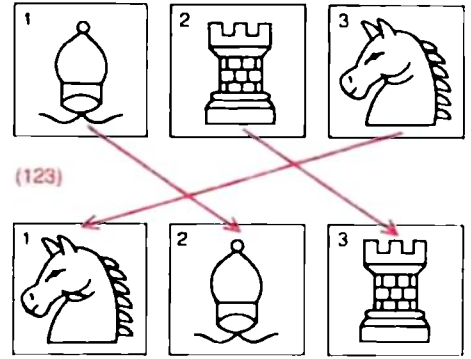
До Галуа почти триста лет никому не удавалось решить в радикалах общее уравнение пятой степени или выше. Многие математики склонялись к мысли, что общее решение такого вида невозможно, хотя в частных случаях, например в случае уравнения  $x^7 - 2 = 0$ , решение можно найти в радикалах. (В этом примере одно из решений — это  $\sqrt[7]{2}$ .) Галуа нашел окончательные критерии, которые позволили определить, существует ли решение данного уравнения в радикалах. Пожалуй, методы, которые Галуа разработал для

решения этой проблемы, еще более замечательны, чем собственно открытия в теории уравнений. Его исследования привели к теории, называемой ныне теорией групп, приложения которой далеко выйдут за рамки теории уравнений.

СВОЮ первую статью в той области, которая в дальнейшем превратится в теорию групп, Галуа представил во Французскую академию наук 25 мая 1829 года, незадолго до окончания лицея. Менее чем через два месяца ему снова предстояло держать вступительный экзамен в Политехнический институт, однако события приняли несчастливый оборот. Второго июля, т.е. за несколько недель до экзамена, отец Эвариста покончил жизнь самоубийством, не вынес скандала вокруг своего имени. (Приходский священник-иезуит Бур-ла-Рена оклеветал старшего Галуа, распространив среди родственников и знакомых Галуа злые эпитеты на него.) Обстановка для экзамена сложилась крайне неблагоприятная. Кроме того, на экзамене Эварист, по-видимому, отказался следовать предложенной экзаменатором схеме ответа; в результате Галуа провалился опять, на этот раз окончательно. Несчастья обострили его ненависть к правившей тогда во Франции консервативной администрации.

Вынужденный подумать теперь о менее престижной Эколь Нормаль (называвшейся тогда Эколь Препаратуар), Галуа в ноябре 1829 г. выдержал необходимый для поступления экзамен. На этот раз его приняли благодаря очень высокому баллу по математике, и примерно в то же время, когда его статья по теории групп была представлена в Академию наук, он стал студентом. Однако статья Галуа не была зачитана на заседании Академии.

Дело в том, что рецензентом назначили Огюстена Луи Коши — самого известного в ту пору французского математика, который был верным сторонником консервативной реставрации. Коши уже занимался комбинаторикой, предшественницей теории групп; позднее он написал много работ, посвященных теории групп. Распространена версия, что Коши потерял, забыл или выбросил рукопись Галуа; но больше похоже на правду, что Коши, понимая ее значение, обращался с ней бережно. Действительно, из письма, обнаруженного Татоном в 1971 г. в архивах Академии, явствует, что 18 января 1830 г. Коши намеревался выступить на заседании Академии с изложением результатов Галуа. Коши писал: «Сегодня я должен был представить Академии отчет о работах Галуа... Я болен и остался дома. Сожалею, что не имею возможности присутствовать на сегодняшнем заседании, и хотел бы, чтобы вы включили в расписание следующего заседания мое выступление по вышеуказанному предмету».



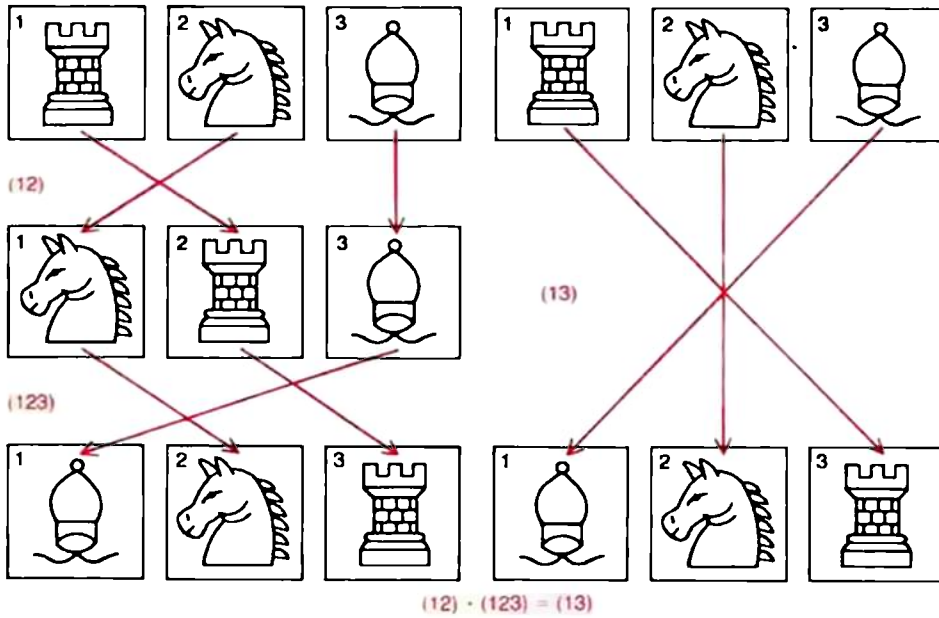
ИДЕЯ ГРУППЫ видна на примере группы  $S(3)$ , которая является группой перестановок трех объектов. Элемент группы  $S(3)$  действует над объектами, переставляя их. Перестановка (123) передвигает объект из клетки 1 в клетку 2, объект из клетки 2 в клетку 3 и объект из клетки 3 в клетку 1. Так как три объекта могут располагаться шестью способами, группа  $S(3)$  состоит из шести элементов.

Однако на следующей неделе, когда Коши выступал перед Академией со своим собственным докладом, он не представил работу Галуа. Почему так получилось — остается предметом догадок. По мнению Татона, Коши настаивал на том, чтобы Галуа расширил свою статью и представил ее на соискание высшей награды Академии по метематике. Хотя предположение Татона не подтверждается документами, Галуа действительно представил свою работу на конкурс в феврале, за месяц до истечения срока конкурса. Статья была послана постоянному секретарю Академии Жану Батисту Фурье, математику, разработавшему метод анализа, который ныне называют анализом Фурье. Однако в мае Фурье умер, и рукопись Галуа среди его бумаг не нашли. Впоследствии Галуа приписывал свое невезение козням со стороны Академии, обвиняя конкурсную комиссию в произволе, — его работу отклонили только потому, что его фамилия Галуа и он всего лишь студент. Некоторые склонны серьезно относиться к утверждению Галуа, однако надо учитывать, что его позиция по отношению к властям была несколько аффектированной.

НЕСМОТЯ на неудачу, Галуа продолжал плодотворно работать и начал публиковать свои труды в *Bulletin des sciences mathématiques, astronomiques, physiques et chimiques*, издававшемся бароном Феруссаком, — менее видном издании, чем публикации Академии наук. Из его статей ясно, что в 1830 г. он ушел далеко вперед в исследовании условий, определяющих разрешимость уравнений, хотя еще и не получал полного решения этой проблемы. В январе 1831 г. он завершил работу и, следуя настоятельным советам математика Симеона Дени Пуассона, представил ее в Академию наук. Эта статья — самая значительная работа Галуа, и тот факт, что она вышла в свет более чем за год до дуэли, лишает смысла историю о том, что все свои работы по теории групп Галуа написал за одну ночь.

Чтобы понять работу Галуа, бесполезно изучать его оригинальные статьи. Пуассон, несомненно, старался разобраться в рукописи 1831 года, но в конце концов рекомендовал Академию наук отклонить

ЗАМЕТКИ НА ПОЛЯХ одной из статей, оставленных Галуа перед смертью. Это наиболее известный документ, который цитируется в подтверждение той версии, что Галуа записал свои мысли о теории групп в ночь перед дуэлью. С левой стороны листа написано: «Доказательство нуждается в некотором дополнении. У меня нет времени (примечание автора)». [«Il y a quelque chose à compléter dans cette démonstration. Je n'ai pas le temps (Note d'A.)»] Согласно известному жизнеописанию Галуа, принадлежавшему перу Э. Белла, фраза «У меня нет времени» часто встречается в рукописях. В действительности воспроизведенная здесь страница — единственное место, где есть эта фраза. Торопливый почерк, каким она написана, резко контрастирует с аккуратными строчками основного текста; это дает основание предполагать, что в ночь перед дуэлью Галуа не писал эту статью, а только редактировал ее. В самом деле, статья уже была представлена в Академию наук; Симеон Дени Пуассон возвратил рукопись Галуа с предложением переработать ее.



$$(12) \cdot (123) = (13)$$

«УМНОЖЕНИЕ» одного элемента группы  $S(3)$  на другой. Чтобы «умножить», надо определить то расположение объектов, которое получится в результате первой перестановки, а затем применить к этому расположению вторую перестановку. Произведением двух перестановок называется единственная перестановка, которая дает то же расположение объектов. Обычно умножение групп не коммутативно: произведение двух элементов зависит от порядка, в котором они берутся. Так,  $(12) \cdot (123) = (13)$ ,  $(123) \cdot (12) = (23)$ .

ВТОРОЙ ЭЛЕМЕНТ

	(1)	(123)	(132)	(12)	(13)	(23)
(1)	(1)	(123)	(132)	(12)	(13)	(23)
(123)	(123)	(132)	(1)	(23)	(12)	(13)
(132)	(132)	(1)	(123)	(13)	(23)	(12)
(12)	(12)	(13)	(23)	(1)	(123)	(132)
(13)	(13)	(23)	(12)	(132)	(1)	(123)
(23)	(23)	(12)	(13)	(123)	(132)	(1)

ТАБЛИЦА УМНОЖЕНИЯ для 6 перестановок трех объектов подтверждает, что перестановки удовлетворяют аксиомам группы. Таблица показывает, что для каждой пары перестановок  $a$  и  $b$  их произведение  $a \cdot b$  само является перестановкой. Имеется единственный элемент, а именно элемент (1), обладающий тем свойством, что  $a \cdot (1)$  равно  $a$ . Для каждого элемента  $a$  существует элемент, называемый обратным, или  $a^{-1}$ , со следующим свойством:  $a \cdot a^{-1}$  равно (1). Например, обратный элемент к (123) есть (132). Наконец, закон ассоциативности, утверждающий, что для любых перестановок  $a$ ,  $b$  и  $c$  произведение  $a \cdot (b \cdot c)$  равно  $(a \cdot b) \cdot c$ , можно проверить с помощью этой таблицы. Красным выделено подмножество из шести перестановок. Их таблица умножения (тоже выделена красным) показывает, что они образуют группу. Такая группа, содержащаяся в другой группе, называется собственной подгруппой.

ее, посоветовав при этом Галуа расширить статью и сделать изложение более ясным. Пуассон также отверг одно из доказательств Галуа, посчитав его неверным, хотя справедливость утверждения Галуа могла быть доказана при помощи одного результата, полученного Лагранжем. Согласно П. Ньюмену из Оксфордского университета, критические замечания Пуассона были справедливы. Аргументация Галуа очень кратка и сжата, что чрезвычайно затрудняет ее понимание; кроме того, встречаются и неточности. Сейчас, через сто пятьдесят лет, можно сформулировать основы теории в доступной форме. Для этой цели обратился за помощью к астрофизику А. Отвиллу из Оксфорда.

Что такое группа? По сути теория групп связана с симметриями, присущими какой-либо системе. Представьте себе снежинку, вершины которой отстоят друг от друга на  $60^\circ$ . Если снежинку повернуть вокруг оси, проходящей через ее центр перпендикулярно к ее плоскости, на  $60^\circ$  или на число градусов, кратное  $60$ , то ее вид в целом останется неизменным, даже если какая-нибудь вершина и изменила свое положение. Операция, которая оставляет общий вид фигуры неизменным в этом смысле, называется операцией симметрии.

Если снежинку последовательно дважды повернуть на число градусов, кратное  $60$ , то ее вид останется неизменным, причем положение вершин будет одним из тех, которые можно достичь и одной операцией (поворотом). Например, поворот на  $60^\circ$  против часовой стрелки, за которым следует поворот на  $240^\circ$  по часовой стрелке, эквивалентен повороту на  $180^\circ$  по часовой стрелке. Вообще, если обозначить через  $R(n)$  поворот на  $60n$  градусов и если результат двух таких операций записать в виде  $R(n) \cdot R(m)$ , тогда для всех целых  $n$  и  $m$  операция  $R(n)$  эквивалентна  $R(m) = R(n+m)$ . Эта эквивалентность означает, что «произведение» двух операций симметрии есть также операция симметрии.

Есть еще три важных свойства поворачивания снежинки. Во-первых, поворот на  $0^\circ$ , или  $R(0)$ , всегда оставляет ее вид неизменным, поскольку ничего не меняется. Сочетание («произведение») любого поворота  $R(n)$  и поворота  $R(0)$  равно  $R(n)$ , так что  $R(0)$  играет ту же роль в поворотах снежинки, что и число 1 в обыкновенном умножении. Поэтому  $R(0)$  называют единичным поворотом. Во-вторых, если произвести сначала поворот  $R(n)$ , а след за ним поворот в противоположном направлении на ту же величину, который можно обозначить  $R(-n)$ , снежинка вернется в исходное положение. Таким образом, произведение  $R(n) \cdot R(-n)$  эквивалентно  $R(0)$ . Поворот  $R(-n)$  называется обратным к повороту  $R(n)$ . В-третьих, операция  $R(m) \cdot R(n) \cdot R(p)$  всегда однозначна, так как  $[R(m) \cdot R(n)] \cdot R(p)$  эквивалентно действию  $R(m) \cdot [R(n) \cdot R(p)]$ . Это формальное свойство операции  $\cdot$ , посредством которой комбинируются два поворота; оно называется ассоциативностью.

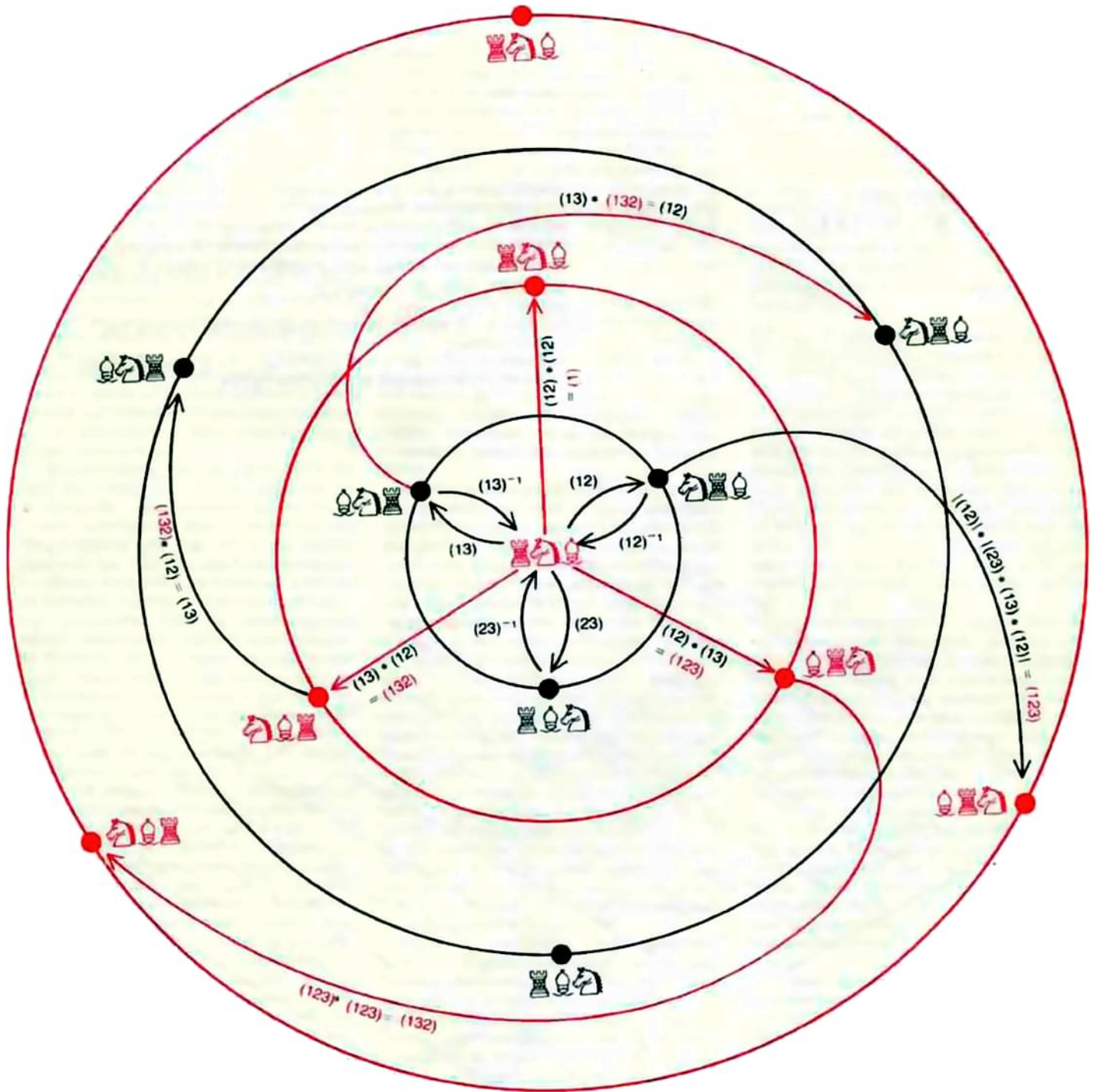
ЧЕТЫРЕ свойства, справедливые для комбинаций поворота снежинки, присущи любому множеству операций симметрии над любой системой; они называются групповыми свойствами. Система не обязательно должна быть геометрической фигурой, как снежинка. Например,

уравнение также является системой, свойства симметрии которой можно описать групповыми аксиомами. Обобщив, мы можем сказать, что группа состоит из элементов, или операций  $a, b, c$  и т.д., и правила, обозначенного  $*$ , посредством которых осуществима комбинация двух элементов. Предполагается, что группа

замкнута относительно операции  $*$ , а именно комбинация  $a*b$  для любых элементов  $a$  и  $b$  группы также является элементом группы. Группа должна включать единичный элемент  $1$ , который определяется следующим образом: для любого элемента  $a$  группы комбинация  $a*1$  равна  $a$ . Далее, для каждого элемента  $a$  должен

существовать обратный элемент  $a^{-1}$ , такой, что  $a*a^{-1} = 1$ . Наконец, предполагается, что элементы группы и групповая операция удовлетворяют свойству ассоциативности, которое утверждает, что  $(a*b)*c$  равно  $a*(b*c)$ .

Теория групп является одной из самых плодотворных областей математики.

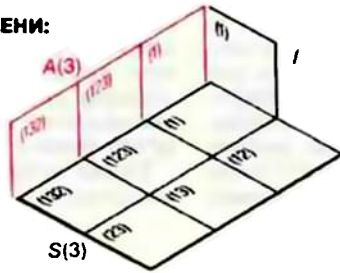


ПЕРЕСТАНОВКИ В ГРУППЕ  $S(3)$  могут быть неизменно записаны как произведение перестановок, которые меняют местами лишь два объекта. Если перестановку можно записать как произведение четного числа таких перестановок, она называется четной; в противном случае она нечетная. Если четная перестановка (цветные стрелки) умножается на четную (цветные стрелки), произведение будет тоже четной перестановкой. Если четная перестановка умножается на нечетную (черные стрелки), произведение нечетно. Аналогично, если нечетная перестановка (черные стрелки) умножается на четную, произведение нечетно, в то время как нечетная перестановка, умноженная на нечетную, дает четную перестановку. Четные перестановки образуют подгруппу, а именно подгруппу, выделенную красным на предыдущем рисунке. Эта подгруппа называется знакопеременной, или  $A(3)$ . Такая подгруппа, как  $A(3)$ , называется нормальной подгруппой группы  $S(3)$ , если для любого элемента  $h$  из  $A(3)$  и любого элемента  $g$  из  $S(3)$

элемент  $g*h*g^{-1}$  также является элементом  $A(3)$ . Для того чтобы доказать, что  $A(3)$  — нормальная подгруппа группы  $S(3)$ , предположим, что  $g$  — четная перестановка. Тогда  $g*h*g^{-1}$  есть произведение трех четных перестановок, которое также является четной перестановкой, и, таким образом, является элементом группы  $A(3)$ . Если  $g$  — нечетная перестановка,  $g*h*g^{-1}$  — произведение нечетной перестановки на четную и еще на нечетную, которое является четной перестановкой. Следовательно,  $A(3)$  — нормальная подгруппа. Подобным же образом можно показать, что для любого числа  $n$   $A(n)$  является нормальной подгруппой группы  $S(n)$ . Число элементов подгруппы должно быть делителем числа элементов основной группы. Так как в  $A(n)$  вдвое меньше элементов, чем в  $S(n)$ ,  $A(n)$  содержит максимальное число элементов, которое может иметь собственная подгруппа группы  $S(n)$ . Значит,  $A(n)$  — максимальная нормальная подгруппа.

## УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕЙ СТЕПЕНИ:

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$$



СУЩЕСТВУЮТ  $a, b, c$  И  $d$ , ТАКИЕ, ЧТО ГРУППА ГАЛУА УРАВНЕНИЯ  $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$  ЕСТЬ  $S(3)$ .

МАКСИМАЛЬНАЯ НОРМАЛЬНАЯ ПОДГРУППА ГРУППЫ  $S(3)$  ЕСТЬ  $A(3)$ . МАКСИМАЛЬНАЯ НОРМАЛЬНАЯ ПОДГРУППА ГРУППЫ  $A(3)$  ЕСТЬ  $I$ .

$$[S(3)/A(3)] = 3!/3 = 6/3 = 2.$$

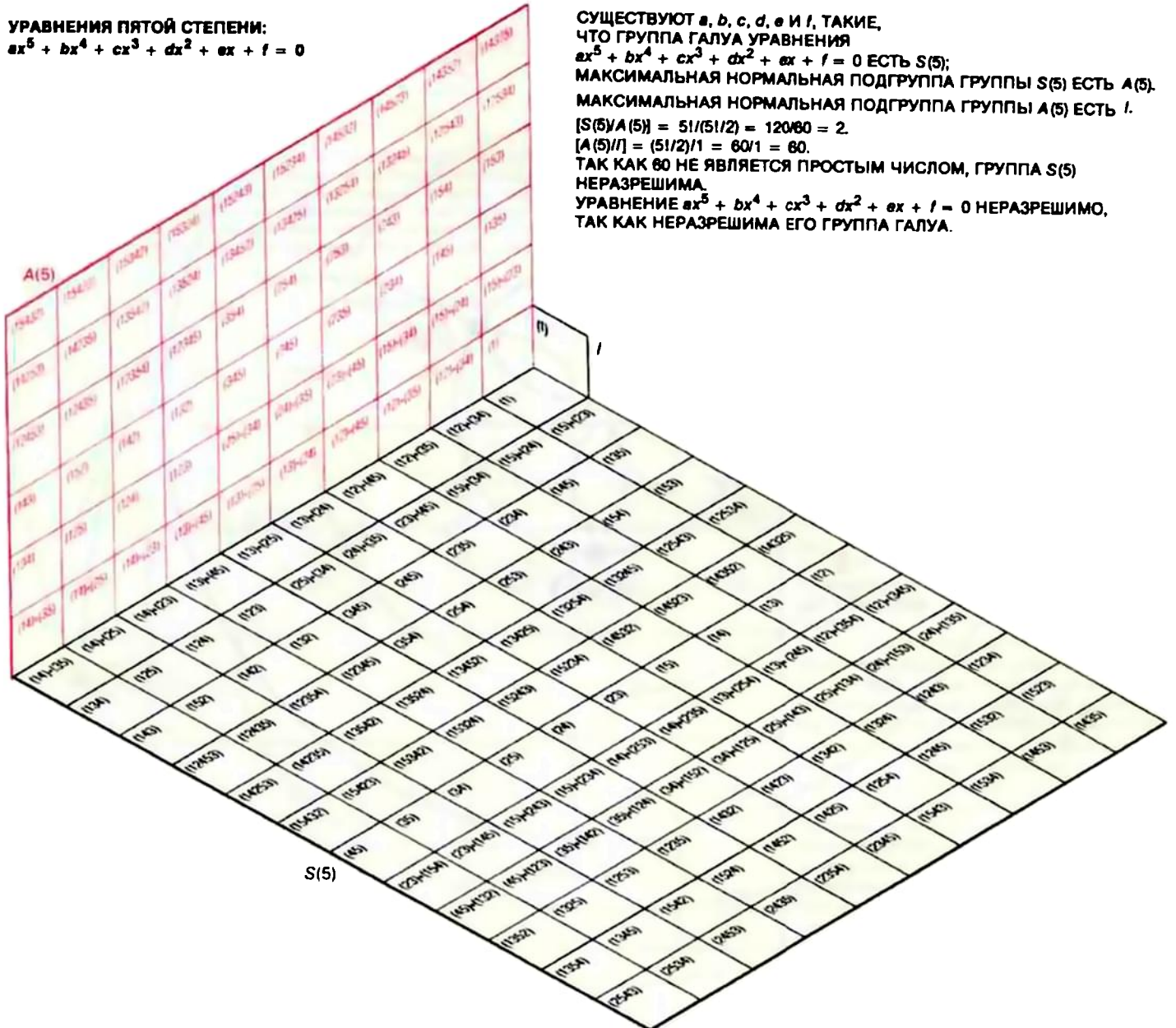
$$[A(3)/I] = 3!/1 = 3.$$

ТАК КАК 2 И 3 — ПРОСТЫЕ ЧИСЛА,  $S(3)$  — РАЗРЕШИМАЯ ГРУППА.

УРАВНЕНИЕ  $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$  РАЗРЕШИМО, ТАК КАК РАЗРЕШИМА ЕГО ГРУППА ГАЛУА

## УРАВНЕНИЯ ПЯТОЙ СТЕПЕНИ:

$$ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f = 0$$



СУЩЕСТВУЮТ  $a, b, c, d, e$  И  $f$ , ТАКИЕ, ЧТО ГРУППА ГАЛУА УРАВНЕНИЯ  $ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f = 0$  ЕСТЬ  $S(5)$ ;

МАКСИМАЛЬНАЯ НОРМАЛЬНАЯ ПОДГРУППА ГРУППЫ  $S(5)$  ЕСТЬ  $A(5)$ . МАКСИМАЛЬНАЯ НОРМАЛЬНАЯ ПОДГРУППА ГРУППЫ  $A(5)$  ЕСТЬ  $I$ .

$$[S(5)/A(5)] = 5!/(5!/2) = 120/60 = 2.$$

$$[A(5)/I] = (5!/2)/1 = 60/1 = 60.$$

ТАК КАК 60 НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПРОСТЫМ ЧИСЛОМ, ГРУППА  $S(5)$

НЕРАЗРЕШИМА.

УРАВНЕНИЕ  $ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f = 0$  НЕРАЗРЕШИМО, ТАК КАК НЕРАЗРЕШИМА ЕГО ГРУППА ГАЛУА.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ было той проблемой, для которой Гауа создал теорию групп. Общий метод решения должен использовать только сложение, вычитание, умножение, деление и извлечение корней и должен быть применим к любому уравнению степени  $n$ , где  $n$  — наивысшая степень, в которой переменная входит в уравнение. Гауа доказал, что при  $n \geq 5$  такого метода, вообще говоря, не существует. Каждое уравнение степени  $n$  можно связать с группой  $S(n)$  или какой-нибудь ее подгруппой; группа, связанная с данным уравнением, называется группой Гауа этого уравнения. Гауа показал, что уравнение можно решить с помощью четырех действий арифметики и извлечения корней, только если его группа Гауа разрешима. Группа считается разрешимой, если она порождает ряд максимальных нормальных под-

групп, для которых индексы (индексы определяют при помощи числа элементов в основной группе и в подгруппах) являются простыми числами. Индексы, порожденные группой  $S(3)$  и ее рядом максимальных нормальных подгрупп, представляют собой простые числа. Следовательно, все уравнения третьей степени разрешимы. Когда  $n \geq 5$ , можно доказать, что максимальная нормальная подгруппа  $A(n)$  есть единичная группа  $I$ , которая состоит только из единичного элемента. Поскольку  $A(n)$  — максимальная нормальная подгруппа группы  $S(n)$ , когда  $n \geq 5$ , не все индексы  $S(n)$  являются простыми числами. Следовательно, имеются уравнения пятой степени и выше, которые нельзя решить этими методами.

Белл был прав, когда писал, что она на сотни лет дала математикам пищу для исследования. Одним из самых важных недавних достижений теории групп был результат, который в январе 1981 г. представил на заседании Американского математического общества Даниэл Горенштейн из Университета Ратгерс. Горенштейн доказал, что список из 26 групп, носящих название спорадических конечных простых групп, является полным. Из этого открытия в некотором смысле вытекает, что компоненты, или «строительные блоки», любой группы с конечным числом элементов теперь исчерпывающим образом классифицированы.

**ДРУГОЙ** совокупностью нечисловых элементов, удовлетворяющих групповым аксиомам, является группа перестановок фиксированного числа объектов. Переставляемыми объектами могут быть, например, шахматные фигуры или буквы алфавита. Существовало, однако, что элементами группы являются не шахматные фигуры, не буквы, а действия, в результате которых получаются различные перестановки объектов. Чтобы найти «произведение» двух элементов  $a$  и  $b$  группы (т.е. найти  $a \cdot b$ ), надо найти результат первой перестановки совокупности объектов и применить вторую перестановку к этому результату.

Предположим, что три шахматные фигуры расположены так, что ладья занимает клетку № 1, конь занимает клетку № 2, а слон — клетку № 3. Один элемент группы перестановок для этих объектов можно записать как (12); это действие перемещает объект из клетки 1 в клетку 2, а объект из клетки 2 в клетку 1. В результате действия элемента (12) на расположение ладья—конь—слон ладья и конь меняются местами и получается расположение конь—ладья—слон. Если снова проделать эту операцию, то объекты в тех же клетках снова поменяются местами и снова получится расположение ладья—конь—слон. Таким образом, элемент (12) является обратным самому себе.

Другой элемент группы, обозначенный (123), переставляет объект из клетки 1 в клетку 2, объект из клетки 2 в клетку 3 и объект из клетки 3 в клетку 1. Предположим, что первоначальное расположение объектов ладья—конь—слон преобразовано с помощью элемента (12) в расположение конь—ладья—слон. Теперь применяется элемент (123), создавая расположение слон—конь—ладья. Это расположение можно достичь за один шаг, применяя к первоначальному, исходному, расположению перестановку (13), которая меняет местами объекты из клеток 1 и 3. Таким образом, результат перестановки (12), к которому применили перестановку (123), создает то же самое расположение объектов, что и перестановка (13). В символической записи:  $(12) \cdot (123) = (13)$ .

**ЧИСЛО** перестановок, или размещений,  $n$  объектов равно  $n!$ . Факториал числа  $n$  есть произведение всех чисел от 1 до  $n$  включительно; например,  $5!$  равно  $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5$ , или 120. Следовательно, число элементов в группе  $S(n)$ , группе перестановок  $n$  объектов, равно  $n!$ . Число элементов в группе называется ее «порядком». Группа перестановок трех объектов  $S(3)$  содержит 3!, или 6 элементов: (1), (12), (13), (23), (123), (132). Здесь (1) — единичная перестановка, которая

оставляет любое расположение объектов неизменным.

Оказывается, что некоторое подмножество множества элементов группы  $S(3)$  само может удовлетворять всем свойствам группы; в этом случае говорят, что оно образует подгруппу. Если число элементов подгруппы меньше числа элементов самой группы, подгруппа называется собственной. Например, легко проверить, что [(1), (12)] является группой и, значит, собственной подгруппой группы  $S(3)$ .

Для любой собственной подгруппы  $H$  группы  $G$  можно определить число, называемое индексом: это порядок основной группы, деленный на порядок подгруппы; обычно он записывается как  $[G/H]$ . Индекс подгруппы [(1), (12)] в группе  $S(3)$  равен  $6/2$ , т.е. 3. Согласно элементарной теореме теории групп, которую мы не будем здесь доказывать, порядок любой подгруппы должен быть делителем порядка основной группы, так что индекс всегда целое число.

Галуа ввел три важнейших понятия, взаимосвязь которых позволила ему доказать, что нет общего метода решения уравнений пятой степени или выше в радикалах\*. Прежде всего Галуа отметил, что каждое уравнение можно связать с некоторой группой перестановок. Такая группа отражает свойства симметрии уравнения; теперь она именуется группой Галуа.

Чтобы понять роль свойств группы Галуа, рассмотрим произвольное уравнение третьей степени с рациональными коэффициентами. Можно доказать, что такое уравнение имеет три корня, однако доказательство не говорит нам, возможно ли эти корни выразить в виде радикалов. Если обозначить корни уравнения через  $u$ ,  $v$  и  $w$ , то из них можно составить полиномиальную функцию, например  $u - v$  или  $uv + w - 1$ . Любую такую функцию можно превратить в другую функцию перестановкой корней  $u$ ,  $v$  и  $w$ . Например, перестановка (12) меняет местами  $u$  и  $v$  и таким образом превращает функцию  $u - v$  в функцию  $v - u$ . В результате такой перестановки многие функции корней изменяют свое значение, но некоторые не изменяются. Например, функция  $u + v + w$  не изменяет значения при любой перестановке  $u$ ,  $v$  и  $w$ . Поскольку группа  $S(3)$  содержит все возможные перестановки  $u$ ,  $v$  и  $w$ , говорят, что  $u + v + w$  инвариантна по отношению к  $S(3)$ .

Можно показать, что значение  $u + v + w$  — рациональное число для любого уравнения третьей степени с рациональными коэффициентами. Другие полиномиальные функции корней могут быть рациональными для некоторых уравнений и иррациональными для других, в зависимости от коэффициентов уравнения. Если значение такой функции рационально, то существует некоторая группа перестановок  $u$ ,  $v$  и  $w$ , которая не изменяет значения функции. Группа Галуа уравнения является наибольшей группой перестановок, которая удовлетворяет этому требованию для любой рациональнозначной полиномиальной функции кор-

ней. Другими словами, для любой полиномиальной функции корней, имеющей рациональные значения, любая перестановка из группы Галуа оставляет значение функции неизменным. Когда перестановка корней не меняет значение некоторой рациональнозначной полиномиальной функции этих корней, то корни неразличимы относительно этой перестановки. Следовательно, чем больше число элементов группы Галуа, тем больше она содержит перестановок, для которых корни неразличимы. По этой причине группа Галуа — мощное средство для представления свойств симметрии уравнения.

Вычислить группу Галуа для данного уравнения обычно очень сложно, хотя в принципе это всегда можно сделать, даже не зная значений корней уравнения. Для целой Галуа, однако, вычисление было не обязательно. Ему нужно было показать только, что всегда найдутся уравнения порядка  $n$ , чья группа Галуа — наибольшая возможная группа перестановок корней, а именно  $S(n)$ .

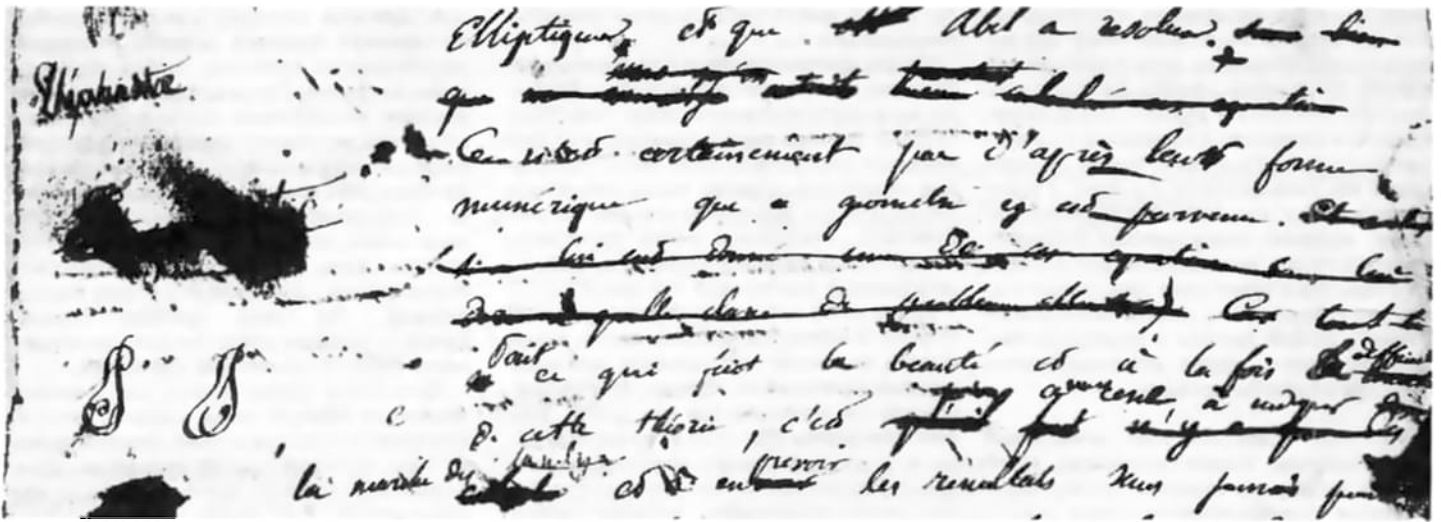
**ГАЛУА** ввел также понятие нормальной подгруппы. Подгруппа  $H$  группы  $G$  нормальна в  $G$  тогда и только тогда, когда выполняется следующее условие: если «умножают» любой элемент  $h$  подгруппы  $H$  слева на любой элемент  $g$  основной группы  $G$ , а затем «умножают» произведение справа на  $g^{-1}$  (обратный элемент к  $g$ ), получается элемент подгруппы  $H$ . Можно записать, что если  $H$  нормальна в  $G$ , то существует элемент  $h'$  в  $H$ , такой, что  $h' = g \cdot h \cdot g^{-1}$ . Например, можно легко убедиться, что [(1), (123), (132)] является нормальной подгруппой группы  $S(3)$  (см. рис. на с. 89).

Если конечная группа  $G$  имеет несколько нормальных подгрупп, должна найтись одна подгруппа, порядок которой больше порядков всех нормальных подгрупп группы  $G$ ; она называется максимальной нормальной подгруппой группы  $G$ . Аналогично, максимальная нормальная подгруппа сама может иметь максимальную нормальную подгруппу, и этот процесс продолжается, пока не будет достигнута наименьшая возможная нормальная подгруппа. Следовательно, любая группа  $G$  порождает последовательность максимальных нормальных подгрупп. Если такую последовательность обозначить  $G, H, I, J, \dots$ , то можно определить ряд индексов максимальных нормальных подгрупп  $[G/H], [H/I], [I/J]$  и т.д.

Третье важное понятие теории Галуа — понятие разрешимой группы. Галуа называл группу разрешимой, если каждый из индексов максимальных нормальных подгрупп, порожденных группой, есть простое число. Например, максимальная нормальная подгруппа группы  $S(3)$  есть [(1), (123), (132)]. В свою очередь максимальная нормальная подгруппа группы [(1), (123), (132)] есть [(1)]. Индекс подгруппы [(1), (123), (132)] в группе  $S(3)$  есть  $6/3$ , или 2, а индекс подгруппы [(1)] в группе [(1), (123), (132)] есть  $3/1$ , или 3. Поскольку и 2, и 3 — простые числа,  $S(3)$  — разрешимая группа.

Термин разрешимая группа хорошо оправдывался теорией Галуа: Галуа показал, что уравнение разрешимо в радикалах тогда и только тогда, когда группа Галуа этого уравнения — разрешимая группа. Чтобы доказать, что уравнения пятой степени и выше нельзя в общем слу-

\* Точнее, эта взаимосвязь позволила ему построить теорию разрешимости уравнений в радикалах. Неразрешимость в радикалах уравнений пятой степени была доказана ранее норвежским математиком Н.-Г. Абелем. — Прим. ред.



ИМЯ ЖЕНЩИНЫ, которую Галуа обвиняет в своих бедах в письме, написанном в ночь накануне дуэли, часто появляется на полях статей Галуа. На факсимиле под именем Эвариста можно прочесть имя Стефания; Галуа также объединил буквы «С» и «Э» в монограмме. Из писем и других рукописей ясно, что злой эпитет

«подлая кокетка» вышел из-под пера Галуа в связи с разочарованием в любви к женщине, которую он встретил всего за несколько месяцев до дуэли. Ее личность установлена: это Стефания Фелисия Потерэн дю Мотель, дочь парижского врача.

чае решить в радикалах, нужно было показать, что существуют уравнения такого рода, для которых группа Галуа неразрешима. Группа  $S(n)$  — неразрешимая группа, когда  $n$  равно или больше 5 (см. рис. на с. 89 и 90). Так как для всех таких значений  $n$  существуют уравнения степени  $n$ , для которых  $S(n)$  является группой Галуа, общее уравнение пятой степени или выше неразрешимо.

КОГДА Галуа заканчивал работу над теорией групп, в его жизнь ворвались политические события. В июле 1830 г. республиканцы — противники восстановленной монархии вышли на улицы; Карл X был вынужден эмигрировать. В то время как революционно настроенные студенты Политехнического института активно участвовали в этих событиях, Галуа и его товарищей по Эколь Препаратуар заперли внутри школы по приказу директора. Возмущенный Галуа пытался сбежать, но ему это не удалось, так что он остался в стороне от событий июльской революции.

Отречение Карла X казалось большой победой республиканцев, однако на троне оказался Луи-Филипп, к великому разочарованию Галуа и других либералов. В последовавшие за революцией месяцы Галуа посещал собрания республиканцев, встречался с их лидерами (особенно с Франсуа Венсаном Распаям) и, по-видимому, принимал участие в волнениях и демонстрациях, лихорадивших Париж. Он вступил в артиллерию Национальной гвардии — подразделение милиции, состоявшее почти исключительно из республиканцев. В декабре Галуа написал в одну из парижских газет письмо, в котором называл директора Эколь Препаратуар предателем, имея в виду его поведение во время июльской революции; неудивительно, что после этого Галуа исключили.

В противоположность традиционной легенде, Галуа вовсе не производит впечатления жертвы обстоятельств. Напротив, он, похоже, был сорвиголовкой и постоянно попадал в переделки. Из письма

математика Софи Жермен следует, что Галуа регулярно присутствовал на заседаниях Академии наук и обычно всячески нападал на выступающих. Когда Галуа исключили из Эколь Препаратуар, он перешел в парижский дом своей матери, но ей оказалось трудно с ним ужиться, и она уехала.

Для Галуа кульминация бурной весны 1831 г. наступила 9 мая во время банкета республиканцев, которые праздновали оправдание девятнадцати артиллерийских офицеров, обвиненных в заговоре против правительства. В своих мемуарах Александр Дюма-отец, который присутствовал на этом банкете, пишет, что Галуа встал и предложил тост за Луи-Филиппа, при этом одновременно с бокалом он поднял кинжал. На следующий день Галуа арестовали, и он провел больше месяца в тюрьме св. Пелагеи.

На суде защитник Галуа утверждал, что тост на самом деле звучал так: «За Луи-Филиппа, если он предаст», однако конец фразы потонул в шуме. Либо судьи поверили защите, либо их тронула молодость Галуа, но они его оправдали. Тем не менее в день взятия Бастилии, 14 июля 1831 г. — т.е. не прошло и месяца после суда, — Галуа снова арестовали, на этот раз за незаконное ношение формы артиллерийской гвардии. Гвардия была распущена как угроза короне, поэтому поступок Галуа был вызывающим. На этот раз он провел в тюрьме св. Пелагеи восемь месяцев.

Тюремное заключение сломило Галуа: он впал в то в ярость, то в уныние. Распай, который находился в тюрьме в это же время, позже вспоминал, что однажды Галуа в состоянии опьянения пытался покончить с собой. Согласно Распаю, Галуа говорил, что его преследует видение собственной кончины: «Я умру на дуэли по вине какой-нибудь кокетки низкого пошиба. Почему? Потому что она заставит меня защищать ее честь, которую оскорбит другой». Когда погиб один из заключенных, Галуа, по-видимому, обвинил тюремного надзирателя в том, что тот подстроил убийство. За это Галуа посадили в

карцер.

Самой большой неприятностью было то, что статьи, написанные Галуа в течение 1831 года, не напечатали. В исполненном горечи предисловии к тюремным запискам он утверждал: «Мне некого благодарить ни за совет, ни за поддержку. Благодарность была бы ложью».

ПОСЛЕДНИЙ период жизни Галуа всегда особенно привлекал его биографов. Они не желали верить самому Галуа, что причиной дуэли была личная ссора, а вместо этого выискивали каких-то продажных женщин, полицейских провокаторов и политических противников и обвиняли их в гибели Галуа. Однако ни одна из подобных версий не подтверждается.

В середине марта 1832 г. из-за свирепствовавшей тогда в Париже эпидемии холеры Галуа перевели из тюрьмы св. Пелагеи в частную лечебницу Фолтрие. По-видимому, именно здесь он и встретил ту «подлую кокетку». Роман был коротким, однако нелепо утверждать, что героиня его была продажной женщиной или платным агентом и намеренно подстроила убийство. Эпитет «подлая» связывали со словами «какая-нибудь кокетка низкого пошиба», и таким образом как бы подтверждалась версия о продажной женщине. Согласно свидетельству Распая, фразу о кокетке низкого пошиба Галуа произнес за год до дуэли; вполне возможно, что это слова самого Распая. Кроме того, 25 мая, за шесть дней до смерти, в письме к Огюсту Шевалье Галуа намекает, что его роман оборвался: «Но как изгладить следы той бурн страстей, через которую я прошел? Как утешиться, когда за один месяц исчерпан до дна источник самого сладостного блаженства, отпущенного человеку, когда он выпит без радости и без надежды, когда знаешь, что он иссяк навсегда?» Кто же была эта женщина? Перед дуэлью Галуа получил два письма, в них упоминалась какая-то ссора, в которой он, видимо, был виновен более, чем сам это признавал. Первое письмо начинается так: «По-

жалуйста, давайте порвем наши отношения. У меня нет сил продолжать с Вами переписку, но я попытаюсь обсудить с Вами все, как я делала до того, как все это случилось...». Второе письмо написано в том же духе, и оба они подписаны «Стефания Д.»». В рукописях Галуа К. Инфантоши из Университета республики в Уругвае прочел имя, которое Галуа устр: Стефания Дюмотель. Инфантоши установил, что это Стефания Фелисия Потерн дю Мотель, дочь врача лечебницы Фолтрие. Позже она вышла замуж за преподавателя словесности.

Брат Галуа Альфред утверждал, что Эвариста убили преднамеренно, но маловероятно, чтобы убийцы подкупили антиреспубликанцы. Согласно Дюма, противником Галуа был Пеше д'Эрбенвиль, пылкий республиканец. В самом деле, д'Эрбенвиль — один из тех девятнадцати офицеров, чье оправдание послужило поводом для вызывающего тоста Галуа. Кроме того, когда во время революции 1848 г. разоблачали агентов короля, имя д'Эрбенвиля не упоминалось. В статье, недавно присланной мне Татоном, говорится, что дуэль происходила между друзьями и представляла собой что-то вроде «русской рулетки», когда заряжают только один пистолет.

В ночь перед дуэлью Галуа лишь отредактировал две рукописи и изложил их содержание и содержание еще одной статьи в длинном письме к Шевалье. Одна из рукописей была той самой статьей, которую отклонил Пуассон, другая — отрывок статьи, ранее опубликованной в *Bulletin* Феруссака. Третью рукопись не нашли, и ее содержание известно лишь из краткого изложения в письме; по-видимому, она касается интегралов от общих алгебраических функций.

Как же быть со знаменитой фразой: «У меня нет времени», которую Галуа якобы вновь и вновь писал на полях, не успевая закончить работу? Эта фраза действительно есть на полях первой статьи, но встречается всего один раз. Рядом с ней в скобках написано: «Примечание автора».

**Я НЕ ДУМАЮ**, что представленные мною факты из жизни Эвариста Галуа сколько-нибудь умаляют его значение как математика. Сохранившиеся рукописи Галуа говорят о том, что, и попав в тюрьму, он продолжал вести математические изыскания и не оставлял их вплоть до самой смерти. То, что он мог продуктивно работать в таких условиях, свидетельствует о необыкновенной силе его воображения и интеллекта. Каковы бы ни были обстоятельства, в которых жил Галуа, нет сомнения, что ему принадлежит одна из самых оригинальных идей в математике.

Однако его репутация, так же, впрочем, как и история науки вообще, не вписывается в распространенное представление, согласно которому гений науки должен быть безупречен в частной жизни, а те его современники, которые не сумели понять его гениальности, непременно глупцы, убийцы, продажные женщины и т.п. Избитое утверждение «Посредственность не терпит гениальности» — несерьезная основа для анализа исторических фактов, иначе пришлось бы судить о гении лишь по его экстравагантным выходкам, вроде тоста с книжкой в руках.

*Том Симкин, Ли Сиберт и др.* Вулканы мира: ПЕРЕЧЕНЬ ПО РЕГИОНАМ, УКАЗАТЕЛЬ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ НАЗВАНИЙ И ХРОНОЛОГИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 000 ЛЕТ VOLCANOES OF THE WORLD: A REGIONAL DIRECTORY, GAZETTEER, AND CHRONOLOGY OF VOLCANISM DURING THE LAST 10000 YEARS. by Tom Simkin, Lee Siebert, Lindsay-McClelland, David Bridge, Christopher Newhall and John H. Latter. Hutchinson Ross Publishing Company, distributed by Academic Press (\$ 19.75)

**КАТАЛОГИ** вулканов не являются чем-то новым. Действительно, первый перечень на трех страницах был опубликован в 1650 г. Его автору — молодому географу из Амстердама Варениусу — уже были известны основные вулканические районы мира. С 1951 г. Международная ассоциация вулканологии и химии земных недр выпускает продолжающийся каталог вулканов по регионам, снабженный картами, фотографиями, списками литературы и результатами химических анализов. Это — «Каталог действующих вулканов мира», издаваемый в Риме и насчитывающий сейчас уже 22 больших тома. Наряду с ежегодным вулканологическим бюллетенем и другими текущими материалами он стал главным источником для составления рецензируемого обобщающего тома. Его основным автором и редактором является куратор по петрологии и вулканологии Национального музея естественной истории в Вашингтоне.

Содержание книги кратко представлено на ее форзацах: на заднем помещена карта вулканов мира, на которой вулканы нанесены красными точками и пронумерованы, на переднем — содержание и аббревиатуры для трех больших обработанных на ЭВМ списков; в книге они занимают 200 страниц большого формата. Главный список — это перечень вулканов, сгруппированных по регионам. Он включает в себя 1353 вулкана, проявлявших свою активность на протяжении последних 10 000 лет, для каждого из которых дана краткая характеристика всех отчетливо выраженных кратеров. Приведены хронология 5564 явных извержений этих вулканов с 8000 г. до н.э. и до 1980 г. н.э., а также алфавитный список географических названий и их синонимов на всех языках мира, от вулкана Аак до Зуогоро-уага.

Известно более 500 вулканов, извержения которых происходили в историческое время и зафиксированы в памяти человечества, что считается доказательством их активности. Однако жизнь Земли последних десяти тысячелетий неравномерно отражена в письменных памятниках.

Еще для ста вулканов имеются вполне надежные датировки извержений, полученные одним или несколькими из известных методов: радиоуглеродным датированием, подсчетом древесных годовых колец или сезонных слоев осадков, изучением изменений направлений магнитного поля и стратиграфическими методами (по стратиграфии пеплов). Извержения остальных вулканов получают менее точную временную привязку либо из-за того, что они до сих пор остаются активными, проявляясь как «горячие точки» в виде горячих источников и fumarол, либо потому, что отмечены трудно уловимыми гео-

логическими свидетельствами, которые бы подтверждали последнедневные извержения. К датировочным категориям может быть также отнесена «антропология». Сведения о времени извержений заключены в легендах народов, живших вблизи вулканов, и в редких находках погребенных артефактов. В итоге установлено почти экспоненциальное увеличение числа письменно зафиксированных извержений в год начиная с 1500 г. по настоящее время. Наивная экстраполяция может привести к заключению, что в ближайшие тысячелетия весь мир превратится в пепел в результате извержений. Безусловно, это не так. Такой вывод был бы основан на обобщении событий за отрезок времени, составляющий всего лишь две миллионные части всего геологического времени. Кривая возрастания числа извержений в год параллельна кривой роста численности населения на Земле, и, вероятно, в действительности отражает распределение в мире не извержений, а числа зафиксированных сообщений очевидцев об этих катастрофах.

Классически описаны лишь десять вулканов — девять в Средиземном море и один в Камеруне. Извержения индонезийских вулканов упоминаются только с 1000 г. Примерно в то же время была заселена Исландия, и с тех пор описания извержений исландских вулканов украшают европейский каталог. Изучение распределения числа извержений известных вулканов во времени выявляет два пика увеличения, которые не трудно объяснить. Первый совпадает с эпохой Возрождения — с бурным развитием книгопечатания и великими географическими открытиями. Второй пик падает на XIX в., когда расширились международные торговые связи, а европейское влияние распространилось на весь мир. Данные XX в. указывают на медленное, однако устойчивое увеличение числа извержений во времени со спадами, соответствующими периодам двух мировых войн и «великой депрессии». Сведения, полученные от очевидцев, обремененных тяготами войны или безработицы, и сомнительные публикации того времени не всегда были достоверны. В свою очередь, несколько современных пиков говорят о том, что пресса, ухватившаяся, например, за катастрофу на Кракатау, склонна расписывать детали извержения в течение последующих пяти — семи лет. Имеющиеся данные служат основанием для подобных утверждений, хотя нет реальных возможностей проверить их вероятность. Один из пиков около 1950 г. на современной кривой не имеет широких исторических параллелей. Возможно, он связан с появлением специальной программы Геологической службы США на Аляске, а также с выходом в свет индонезийского тома «Каталога действующих вулканов мира».

Однако не Кракатау, а вулкан Тамбора, расположенный к востоку от Явы, занимает первое место по активности и по объему выброшенного пепла. Трехлетнее пепловое извержение вулкана Тамбора было, вероятно, причиной неурожая в Атлантике в 1816 г., когда в Новой Англии, например, не видели ни одного месяца настоящего лета. Более древние извер-

жения известны отнюдь не по свидетельствам людей, а только по геологическим данным. Пятнадцать миллионов лет назад необитаемые земли северо-западной части современной территории США за несколько дней были затоплены лавовыми потоками, размеры которых на порядок превышали размеры любых из упоминаемых в книге. За 75 000 лет до извержения Тамбора в таком же необычайном масштабе происходило извержение вулкана Тоба на острове Суматра. Возможно, и сейчас в каком-то неизвестном нам месте в магматической камере глубоко под давно потухшим вулканом продолжают медленные процессы концентрации газов.

Плоские сложенные пеплом столовые горы, безмолвно лежащие в верховьях Рио-Гранде, хранят свидетельства о том, что миллионы лет вулканического покоя могут вдруг завершиться гигантским извержением, превышающим по масштабам любое из известных в историческое время. Следовательно, этот тщательно составленный и всеобъемлющий каталог может и не учесть вулканы, извержение которых может начаться в любое время. Меньше чем один из десяти вулканов, показанных на карте в этой книге, расположен в стороне от границ современных плит и находится над древними термальными «струями», поднимавшимися из мантии Земли. Подводный вулканизм освещен недостаточно, хотя гидрофоны неумоимо слушают моря и океаны. Остались без внимания алмазные трубки, которые вполне могут оказаться редкой разновидностью холодных вулканов.

Рецензируемый каталог является замечательной в своем роде работой, в которой обобщена вся относящаяся к теме литература и которая привлекает к загадкам прошлого даже внимание специалистов, далеких от вулканологии.

Джон Напьер. Руки

HANDS, by John Napier. Pantheon Books (\$13.95)

КОГДА руки спокойны, спокойно и лицо; но ловкая рука — порождение живого ума». Придворный карлик с картины Веласкеса хитро смотрит на вас, а его ловкие руки тем временем искусно тащут колоду карт; покой сложенных в молитве рук Дюрера или скрытая мощь неподвижной мраморной руки Давида не так поражают. Об этих и многих других руках, человеческих и обезьяньих, полных и худых, рассказывается в увлекательной и, кажется, такой короткой книге, написанной ведущим английским специалистом по приматам Дж. Напьером, который к тому же фокусник-любитель и врач, «влюбленный в руку». Его книга написана намеренно не слишком специально, полна юмора и читается легко. Она предназначена для широкого круга читателей, а также для ученых-неспециалистов.

Рука — орудие наиболее осознанной двигательной активности человека (если не считать речи), главный орган осязания, основа древней и тонкой сигнальной системы. Структурно рука не является высокоспециализированным органом, поскольку многие черты ее строения явно древние и лишь некоторые приобретены сравнительно недавно. Масса нервных связей с высшими центрами мозга — вот

что для нее характерно; рука — это биоэлектронное чудо.

Точный и силовой захват, роль свободы вращения противопоставленного большого пальца, увеличение жесткости и четкая дифференцировка захватов у человекообразных обезьян — все эти в общем-то не новые вопросы Напьер рассматривает по-новому интересно. В книге приводятся рисунки костей рук наших предков, живших три миллиона лет назад в районе Афарского треугольника (Африка), и неандертальцев, обитавших в северных странах. Рука мустьерцев уже была приспособлена для точного захвата, но в какой мере они использовали эту приспособленность, мы не знаем. Орудия с каменными наконечниками того времени годятся только для силового захвата; по всей вероятности, точный захват вошел в практику лишь в верхнем палеолите, когда человек стал обрабатывать кости, рога и дерево. О двух типах захвата говорят с точки зрения функции, но их можно выделить и анатомически: мышцы, осуществляющие точный захват, контролируются срединным нервом, а большинство мышц, обеспечивающих силовой захват, — локтевым нервом.

Долгая эволюция руки раскрывается в книге по-новому — и вполне убедительно. Предшественниками приматов были насекомоядные животные, ориентировавшиеся в основном с помощью обоняния. Приматы подносят пищу ко рту, они — рот к пище. Конечно, есть и неприматы, которые тоже едят пищу из лап, например медведи и выдры, но в остальном их поведение сильно отличается.

Изменения в характере питания и увеличение размеров тела способствовали развитию цепкости. В рацион помимо насекомых, которых животные ловили на коре деревьев, вошли плоды, почки и листья. В поисках пропитания животные стали осмеливаться перебираться со ствола в крону дерева, где новая пища встречалась в изобилии. По тонким веткам небольшому животному передвигаться легко, но с увеличением размеров тела все труднее сохранять устойчивость, и большие животные не могут так проворно двигаться в кроне дерева; выбор состоял в том, чтобы либо сохранить небольшие размеры и, следовательно, свободу передвижения, либо повиснуть на ветке, укрепившись в двух, трех или четырех точках (при этом одновременно удваивалась зона питания, так как становилась доступной область не только над веткой, но и под ней). Затем передние конечности превратились в ступни или кисти и в конце концов вновь, так сказать, ступили на землю.

Хождение на двух ногах возникло по крайней мере так же давно, как род *Homo*; история его происхождения далеко не ясна. Кости стопы находят довольно редко, но еще меньше сохранилось останков кистей рук: они были слишком мелкими, чтобы избежать разрушения и уничтожения некрофагами.

Напьер как человек, привыкший работать руками, придерживается мнения, что род людской возвысился благодаря изготовлению орудий труда. Это произошло не внезапно, а постепенно: вначале люди использовали орудия, созданные самой природой, затем стали осмысленно их обрабатывать и, наконец, сознательно изготавливать орудия труда, что превосходило

возможности человекообразных обезьян. Однако в этой гипотезе также еще не сказано последнее слово. Роль переноски предметов, вероятно, недооценивается, хотя руки определенно подходят для этой цели.

Очень интересна глава о право- и лево-рукости. Похоже, что среди шимпанзе тоже есть левши и «правши», хотя это и не очень ярко выражено. Каменные орудия нижнего палеолита указывают на доминирование правой руки. Такое доминирование характерно для современного человека; возможно, оно развилось в результате применения «правых» орудий труда, таких, как серп, или же в результате привычки матерей — как левшей, так и «правшей» — прижимать дитя к сердцу, т.е. к левой стороне груди. Известно, что к успокаивающему ритму биения сердца материн младенец привыкает задолго до рождения.

Отпечаткам пальцев, жестам, нервам, скелету, волосам на руках — всему уделяется внимание в этом интересном обзоре, может быть не всегда в той мере, как нам бы хотелось. Читатель узнает много удивительного. Так, у человекообразных обезьян нет одной особой большой мышцы, с помощью которой можно складывать руку горстью, так что эту способность можно считать истинно человеческим признаком. Анатомически мы вовсе не просто безволосые человекообразные обезьяны. (Волос, кстати, у нас практически столько же, сколько у любого шимпанзе, только наши волосы тонкие, короткие и светлые, а у шимпанзе они грубые, длинные и темные.) На ладонях у человека нет ни волос, ни жирового слоя. (Подкожный жировой слой — еще одна характерная черта вида *Homo sapiens*.) У людей, в отличие от почти всех других животных, довольно сильное потогонное деление — и на ладонях, и в других местах. И танцор с острова Бали, и генерал, выступающий по телевидению, пользуются языком жестов, более древним, чем речь. «Если язык дан человеку, чтобы он скрывал свои мысли, то жесты призваны разоблачать их» — так заканчивает свою книгу Напьер, который изложил свои мысли так же ясно, как ясно вы видите свои руки.

Стивен Фогель. Жизнь в движущихся жидкостях: физическая биология потока

LIFE IN MOVING FLUIDS: THE PHYSICAL BIOLOGY OF FLOW, by Steven Vogel. Willard Grant Press, 20, Providence Street, Boston, Mass, 0216 (\$ 18)

ИЗВЕСТНО, что даже сильной струей воды тарелку хорошо не вымоешь, все равно ее еще нужно тереть тряпкой или щеткой. На вращающихся лопастях вентилятора скапливается пыль. Трубы, по которым течет вода, со временем не становятся более гладкими, а наоборот, обрастают слоем накипи, причем если в воде есть немного песка, эрозия, вызываемая протекающей водой, гораздо сильнее. Дело в том, что слой воды или воздуха в непосредственной близости от твердой поверхности практически неподвижен. Поток не скользит по твердой поверхности, будь она шероховатая или гладкая, жирная или чистая. В пограничном слое всегда есть градиент скорости. Это от-



крытне, сделанное в начале XX в., очень важно в развитии механики жидкостей и газов. Людвиг Прандтль первым установил, что даже в турбулентном потоке тонкий слой вблизи твердой поверхности «помнит», что реальные жидкости и газы вязки. Такой подход позволил разрешить парадоксы классической гидро- и аэродинамики. Не только в реальной действительности, но и в теоретических представлениях вихревые потоки породили подъемную силу, лобовое сопротивление и состояние полета в полном согласии с законами Леонарда Эйлера и Исаака Ньютона.

Похоже, что об особом состоянии пограничного слоя в жидкостях и газах живой природе давно известно. В потоке текучей среды: в струях воздуха или воды, в волнах прибоя, в стоячем воздухе между стеблями травы — везде обитают живые организмы. Конечно, существенно, что именно и с какой скоростью проходит через пограничный слой — вода, тепло, частички пищи или пропагулы (так называют различного рода образования, способствующие размножению и распространению живых организмов, например споры, семена). Бактериям для передвижения достаточно диффузии, крупные организмы могут передвигаться сами — они ходят, плавают. Крошечным же спорам и частицам пыльцы, занимающим по размеру промежуточное положение, возможность «свободного воздушного транзита» должен обеспечивать какой-то механизм.

Для тех, кто сомневается в этом, есть отличный пример. Если споры плауна насыпать на бумагу, моделирующую поверхность листа растения, и такой «лист» закрепить в аэродинамической трубе, оказывается, что когда споры и шероховатости листа примерно одного размера, споры поднимаются в воздух лишь при скоростях набегающего потока, соответствующих ураганному ветру, но малейший выступ на поверхности листа способствует отделению спор: при умеренном ветре достаточно даже буторок высотой в миллиметр. Живая природа очень изобретательна. Например, паразитирующий на ячмене гриб твердая головня приспособилась делать пораженные колосья жесткими, так что они не сгибаются на ветру и споры гриба свободно разносятся по воздуху. Другой известный гриб, *Pilobolus*, свои споры выстреливает из своеобразной пушки, причем выбрасываются не сами споры (они настолько малы, что просто медленно вываливались бы из гриба), а спорангии — коробочки со спорами. Спорангии, естественно, крупнее спор и улетают сравнительно далеко. У гриба-дождевика, маха, шалфея, лишайников, белой омелы тоже есть свои маленькие катапульти, в некоторых из них используется энергия дождевых капель и ветра.

На Тихоокеанском побережье США полюсу приливов заполонили плоские морские ежи (уж не связано ли это с многочисленными предприятиями авиакосмической промышленности?). Тело морского ежа имеет такой профиль, что возникает существенная подъемная сила, однако нижней своей частью животное прочно зарывается в песок и остается совершенно неподвижным. Подъемная сила направлена горизонтально и поэтому сама по себе особого интереса не представляет, но создающая ее циркуляция воды подносит

частицы пищи к придаткам на теле морского ежа, через которые он питается. Эти иглокожие всегда живут группами; тела их торчат из песка параллельно друг другу, образуя своего рода многокрылую систему гидродинамических профилей, расстояние между которыми может меняться более чем в 10 раз в зависимости от скорости локальных течений.

«Сейчас в основном русле биологии нет места для потока», — заявляет Фогель в своей шуточной манере иконокласта и тем не менее пишет книгу, которая представляет собой не только введение в физику текучих сред, но и достаточно полный очерк многих проблем жизни в потоке. Автор всегда сохраняет чувство меры и физического смысла — анализирует ли он простые уравнения, которыми приходится пользоваться, или рассказывает о том, как косвенными методами измерить лобовое сопротивление. «Однажды я определял подъемную силу закрепленного крылышка мухи. Сначала измерил скорость воздушного потока в каждой из серии точек, расположенных за крылышком. Затем, поместив в каждую точку тоненькую проволочку, датчиком направления относительного воздушного потока центрировал за ней аэродинамический след и для каждой точки получил локальное направление ветра. С этими данными рассчитать направленную вниз компоненту импульса было уже просто».

Примерно третья часть книги посвящена примерам, на которых нас знакомят с физикой потока в сфере живого (за исключением сверхзвуковой аэродинамики и динамики горячих газов). Основная безразмерная характеристика течений — число Рейнольдса — может сильно варьировать. Пределы изменения этой величины — от  $10^{-7}$  для мелких глубоководных организмов, фильтрующих планктон, до  $10^8$  и более для кита. (Почему китам удается так хорошо фильтровать планктон, пока еще непонятно.) Фогель рассказывает о напоре ветра, который испытывают деревья, травы и насекомые, о жизни в градивенте скорости, о течении в трубках, о подъемной силе листьев, взмывающих вверх, спокойно планирующих, трепещущих на ветру или тихо кружащихся в осенних сумерках. О течении в трубках — тема очень сложная и с медицинской точки зрения важная — говорится лишь в самых общих чертах. «Я не хочу подробно останавливаться на неустановившемся течении неизоотропной неньютоновской жидкости по нежестким трубкам», — признается Фогель. «О кровотоке каждый год публикуется примерно  $10^4$  статей».

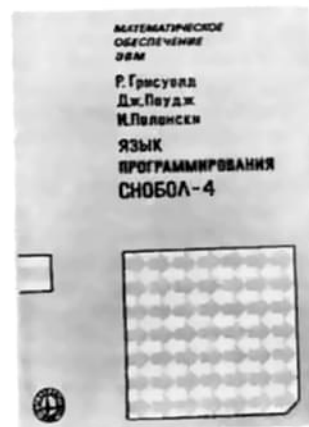
Книга Фогеля, богатая экспериментальными фактами, снабженная хорошо подобранной библиографией, была бы очень кстати и биологам, которые стремятся к количественному пониманию многообразия адаптаций, и читателям-неспециалистам, которые хотели бы узнать о различных аспектах механики жидкостей и газов; пригодится она также преподавателям и студентам, которым нужен учебник, написанный в духе доверительной беседы.

## Издательство МИР предлагает:

Р. Грисуолд,  
Дж. Поудж,  
И. Полонски

### ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ СНОБОЛ-4

Перевод с английского



Язык программирования Снобол-4, реализованный на большинстве зарубежных машин, отличается чрезвычайно широкой средой применений и имеет общеобразовательное значение. Этот язык содержит ряд средств и понятий, никак не отраженных в других языках программирования. Настоящая монография является первой работой на русском языке, содержащей обстоятельное и полное описание самого языка и некоторых сторон его реализации.

Книга адресована специалистам разной квалификации по системному и прикладному программированию и может быть рекомендована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов.

1980, 13л. Цена 95к.

Эту книгу вы можете приобрести в магазинах книготоргов, распространяющих научно-техническую литературу. Если в ближайшем от вас магазине книги 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)



## Почему слипаются влажные частицы песка и глины?

ДЖИРЛ УОЛКЕР

«ЗАМКИ» из песка и «пироги» из глины лепят для забавы, но они наводят на интересные размышления. Хотя песок и грязь состоят из частиц в основном одинакового состава, их свойства сильно различаются. Действием каких сил объясняется прочность замков из песка и пирогов из глины? И почему замки из песка рассыпаются после высыхания, а пироги из глины остаются целыми? Чем объясняется усадка пирогов из глины после высыхания? Каким образом вода, которая обычно играет роль смазки, повышает сцепляемость частиц песка и глины? Ответы на эти вопросы можно получить, рассматривая электрические взаимодействия между водой и частицами песка или глины.

Песок состоит из довольно крупных, приблизительно сферических частиц, которые остаются плотно упакованными, даже если они увлажнены. Об их плотной упаковке можно судить по тому, что при высыхании не происходит усадки песка. Влажная песчинка имеет на своей поверхности положительные и отрицательные ионы, обычно группирующиеся парами, причем в каждой паре один из двух ионов расположен несколько дальше от поверхности, чем другой. На различных участках поверхности внешними оказываются ионы разного заряда. Эти распределения зарядов создают электрическое поле в пространстве, окружающем песчинку. Если внешний ион положителен, то вектор напряженности электрического поля направлен наружу от поверхности песчинки; если же он отрицателен, то вектор напряженности направлен вовнутрь от поверхности.

Электрическое поле, окружающее песчинку, в результате усреднения зарядов должно было бы обращаться в нуль, однако этого не происходит из-за поляризации заряда отрицательных ионов на поверхности. С одной стороны от такого отрицательного иона находится положительный ион, расположенный несколько дальше от поверхности, с другой — вообще нет заряда. Поскольку отрицательный ион имеет большую величину отрицательного заряда, чем положительного, его отрицательно заряженное электронное облако слегка смещается от положительно заряженного ядра к соседнему положительному иону. Это небольшое разделение положительного и отрицательного зарядов, называемое электрическим диполем, создает сравнительно слабое электрическое поле, направленное наружу от поверхности песчинки. Положительный ион на поверхности песчинки имеет недостаток отрицательного заряда, поэтому разделения зарядов не происходит; такой ион является источником электрического поля, характерного для точечного заряда, а не более слабого дипольного поля. Таким образом, электрическое поле вокруг песчинки обусловлено в основном положительными ионами на ее поверхности.

Прочность влажного песка объясняется электрическим взаимодействием между этими положительными ионами и молекулами воды, находящимися между песчинками. Согласно несколько устаревшей модели такого взаимодействия, вода является поставщиком отрицательных ионов ( $\text{OH}^-$ ), которые притягиваются к песчинкам и электрически экранируют места, где расположены положительные заряды. Положительные ионы ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) остаются в той части воды, которая удалена от поверхности песчинки. Притяжение между положительными ионами в толще воды и отрицательными ионами на поверхности песчинки затрудняет скольжение одной песчинки вдоль другой. Хотя эта модель позволяет объяснить прочность влажного песка, она имеет недостаток: степень ионизации воды низка для того, чтобы обеспечить требуемое количество ионов  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

До сих пор не создано полной модели влажного песка, но существует одно современное объяснение электрического взаимодействия, которое не исходит из предположения об ионизации воды. Электрическое поле, образуемое положительно заряженными участками поверхности песчинки, несколько снижает положительный заряд воды, окружающей поверхность. Это уменьшение не связано с ионизацией, потому что в молекуле воды не происходит полного разделения зарядов. Электрическое поле просто смещает средние положения ядер атомов водорода (протонов) в молекулах, находящихся дальше от поверхности. Слой молекул воды, прилегающий к поверхности песчинки, приобретает небольшой избыточный отрицательный заряд, а слой молекул воды, расположенный дальше от поверхности, — небольшой избыточный положительный заряд. Переход от слоя с избыточным отрицательным зарядом к слою с избыточным положительным зарядом происходит плавно; такая картина может кратко называться моделью диффузного двойного слоя.

В рамках ионной модели прочность влажного песка объясняется притяжением противоположно заряженных ионов в воде. Согласно модели диффузного двойного слоя, прочность влажного песка обусловлена тем, что молекулы воды способны терять подвижность. Электрические поля, создаваемые положительно заряженными участками поверхности песчинки, перераспределяют средние положения протонов в воде, поэтому текучесть воды снижается. Прочность влажного песка объясняется тем, что повышенная вязкость воды затрудняет скольжение песчинок относительно друг друга.

Описанное связывание воды уменьшается с расстоянием от поверхности песчинки. Когда песок увлажнен настолько, что он течет и из него нельзя лепить замки, это происходит из-за большого ко-

личества воды между песчинками. Хотя слой воды с избыточным отрицательным зарядом, окружающий песчинку, по-прежнему притягивает слой воды с избыточным положительным зарядом, удаленным от песчинки, отдельные частицы слишком сильно разъединены водой. Часть воды между песчинками недостаточно близка к какой-либо из них, чтобы принимать большое участие в электрическом взаимодействии. Эта менее вязкая вода течет, позволяя соседним песчинкам (вместе с окружающими их слоями, несущими избыточные заряды противоположного знака) скользить относительно друг друга.

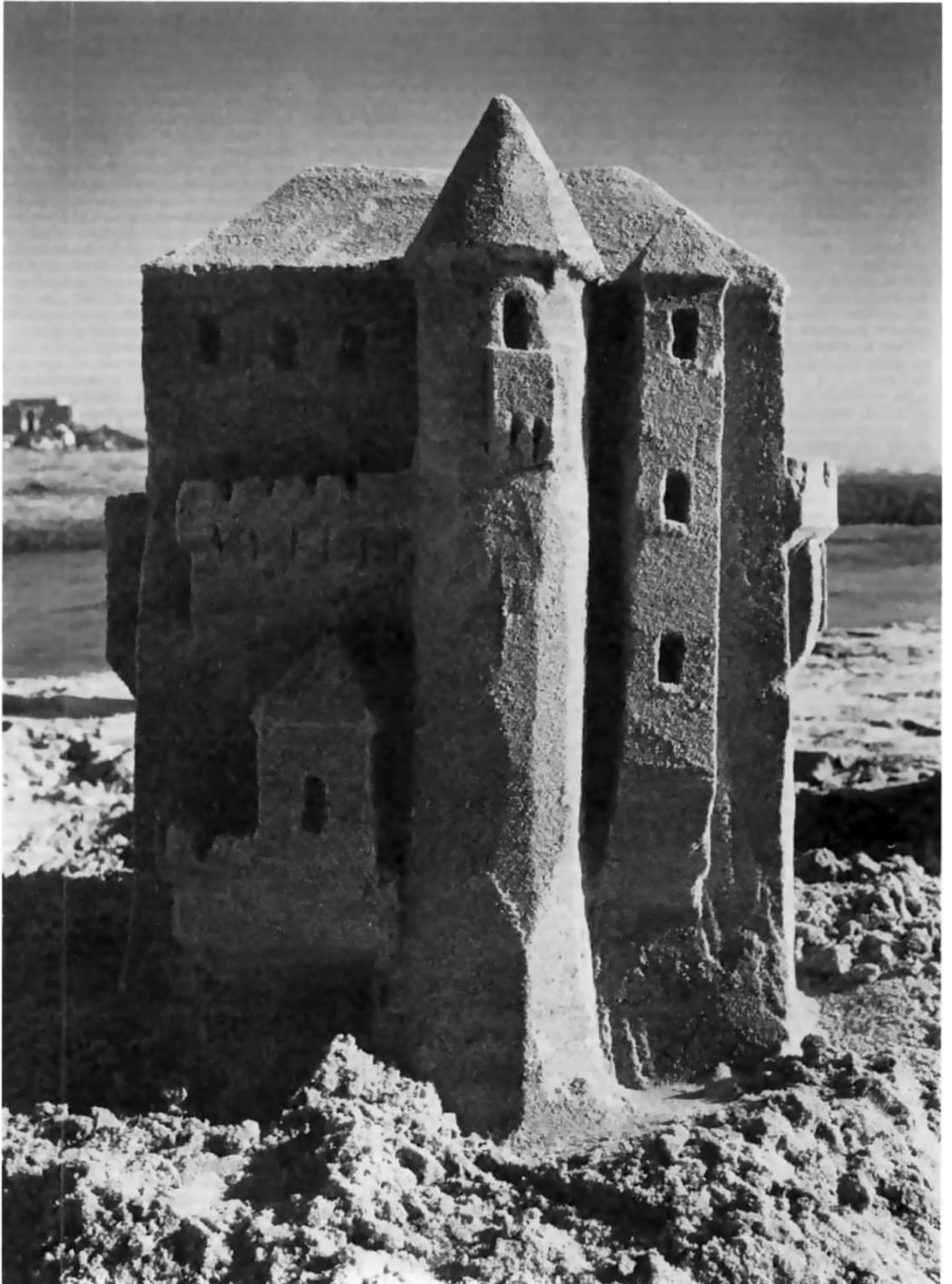
Считают, что прочность песочных замков обусловлена силой поверхностного натяжения воды, действующей на песок. Молекулы воды называют полярными, потому что они обладают постоянными электрическими диполями. Эти диполи притягивают друг друга. На поверхности между воздухом и водой взаимное притяжение соседних молекул воды создает состояние натяжения. Если такая поверхность искривляется, то взаимное притяжение диполей вызывает появление коллективной силы.

Эта коллективная сила действительно помогает сцеплению частичек на поверхности песочного замка. Однако песок не менее прочен внутри замка, где не остаются воздушные зазоры. Молекулы воды притягиваются друг к другу благодаря взаимодействию электрических диполей, однако притяжение слишком мало, чтобы объяснить прочность влажного песка и его сопротивляемость течению. В стакане чая молекулы воды тоже притягиваются друг к другу, но эта вода остается текучей.

Когда песочный замок высыхает, он рассыпается из-за уменьшения в нем количества связанной воды; при этом заряды на поверхности песчинок перестраиваются. Поверхностные ионы образуют двойной слой зарядов, называемый гельмгольцевым двойным слоем; каждый положительный ион в нем несколько больше углубляется в поверхность, располагаясь под внешним отрицательным ионом. Электрическое поле, создаваемое таким расположением зарядов, ощущают лишь на самой поверхности. Соприкасающиеся между собой сухие песчинки отталкиваются друг от друга, поскольку на поверхности каждой из них имеется внешний слой из отрицательных ионов. Вот почему сухие песчинки не слипаются.

Если добавить в воду глицерин, то увлажненный такой смесью песок оказывается непрочным. Молекулы глицерина электрически экранируют положительно заряженные участки поверхности песчинок и тем самым уменьшают электрическое поле в воде. Более слабые поля не вызывают достаточного упорядочивания слоев воды, и, поскольку вязкость воды повышается недостаточно, песчинки перестают сцепляться.

Влияние глицерина очень просто продемонстрировать. Сначала наполните влажным песком детское ведро и утрамбуйте в нем песок. Накройте ведро плоской тарелкой и быстро переверните, прижимая их друг к другу. Поставив тарелку на пол, осторожно поднимите ведро — на тарелке останется «кулич». Испытайте прочность песочного кулича потряхиванием тарелки или постукиванием по ней.



Фотография песочного замка из книги: *Sandcastles*, © 1981 by Joseph Allen, Don McQuiston, Debra McQuiston and Marshall Harrington, published by Doubleday, Inc.

Теперь повторите опыт, добавив глицерин в воду, с которой смешивается песок. Утрамбуйте песок в ведерке и после переворачивания снова снимите ведерко. Скорее всего, песочный кулич в этом случае окажется менее прочным, чем сделанный без добавки глицерина. Тряхнув тарелку или ударив по ней, вы легко разрушите кулич. Чем больше глицерина добавлено в песок, тем менее прочным окажется кулич. Результат этот удивителен. При добавлении вязкой жидкости (глицерина) в очень вязкую смесь (влажный песок) происходит *снижение вязкости!*

Свойства влажной глины отличаются от свойств влажного песка. Ее частицы значительно меньше песчинок и имеют пластинчатую форму — в одном измерении они меньше, чем в двух других. Частицы влажной глины упакованы неплотно и хорошо отделены друг от друга водой. Одним из проявлений неплотной упаковки является усадка глины в процессе высыхания.

На поверхности частицы глины положительно заряженные участки выступают сильнее, подобно тому как это имеет место у песчинок. Согласно старой ионной модели влажной глины, ионы  $\text{OH}^-$

сцепляются с этими участками; при этом ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  остаются в воде между частицами глины. Прочность влажной глины обусловлена притяжением между ионами этих двух типов. В рамках более современной модели влажной глины считается, что вода связывается под действием электрических полей, образуемых положительно заряженными участками на поверхности частиц глины. Как и в модели влажного песка, такая связанная вода имеет повышенную вязкость. Влажная глина прочна потому, что ее частицы не могут скользить относительно друг друга. Если глина слишком влажная, то она теряет прочность. В отдалении от частиц глины вода имеет меньшую вязкость и способна течь.

Высыхание глины имеет существенное отличие от высыхания песка. Заряды на поверхности песчинки могут смешаться и образовывать на ней гелемгольцев двойной слой, однако этого не происходит с частицами глины. Частицы глины слишком тонкие в одном измерении, чтобы на противоположных поверхностях в этом измерении могли образоваться двойные слои. В этом случае внутренние слои заряда (которые имеют одинаковый

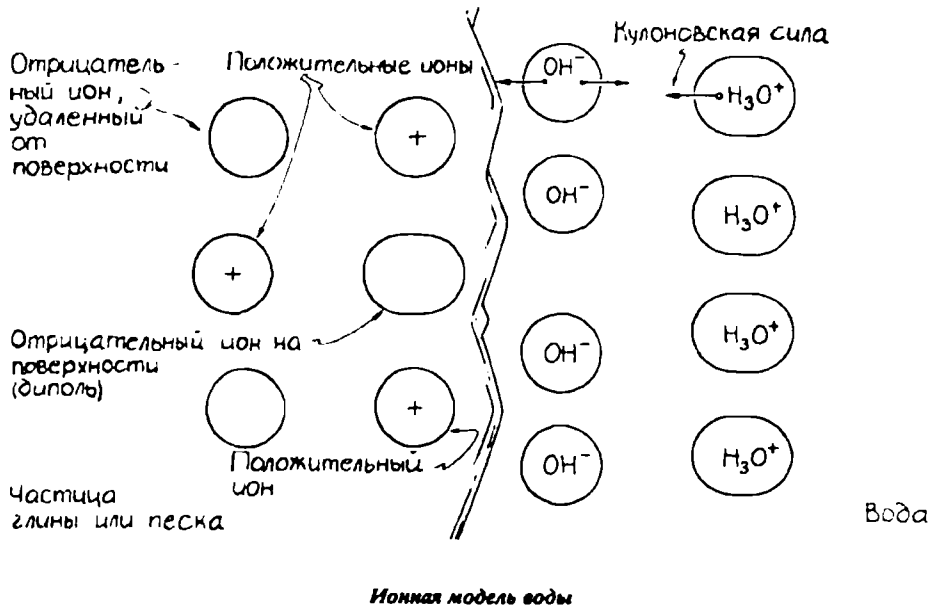
знак) должны были бы отталкивать друг друга слишком сильно, чтобы такая система оказалась устойчивой.

Поскольку на частицах глины не может образовываться гелемгольцев двойной слой, при ее высыхании частицы должны сохранять свой диффузный двойной слой и возникающая благодаря его наличию связанная вода остается между частицами. Структура глины сохраняется прочной. Более того, прочность глины даже возрастает вследствие сближения частиц и еще большего связывания воды. По мере усадки такой структуры и образования новых точек соприкосновения между частицами последние связываются друг с другом общими ионами. Они также сопротивляются смешиванию из-за остающейся связанной воды. Кроме того, связыванию частиц способствуют и другие силы электрического происхождения.

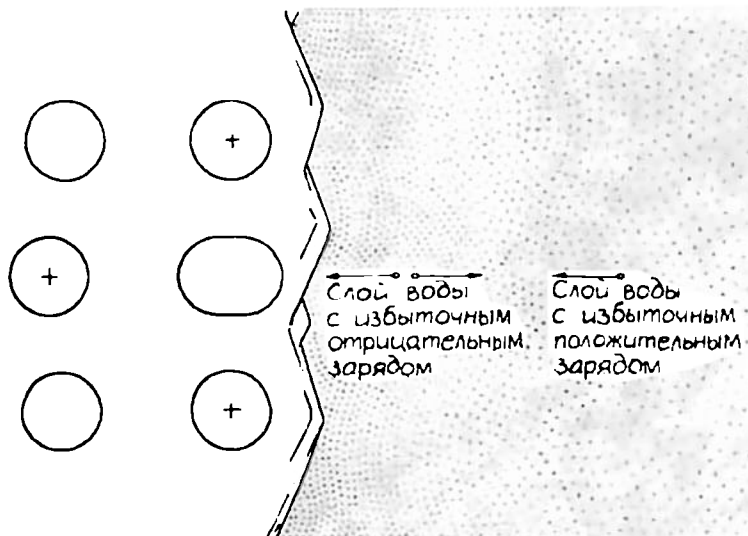
Частицы песка упакованы плотно, а частицы глины — неплотно. Различие в этих упаковках связано с различием в форме и размерах частиц. Представим себе песчинку, которая падает и приходит в соприкосновение с покоящейся частицей. Удержится ли упавшая песчинка на другой или же скатится либо соскользнет по ней и продолжит свое движение вниз? В том месте, где песчинки приходят в соприкосновение, силы притяжения достаточно велики, чтобы удержать их вместе. Однако сила гравитационного притяжения, действующая на упавшую песчинку, создает на ней крутящий момент, который стремится повернуть ее вокруг точки соприкосновения с другой частицей. Часть действующих между песчинками сил притяжения создает крутящий момент противоположного направления. Поскольку песчинка сравнительно тяжела, крутящий момент, обусловленный гравитацией, превышает момент, обусловленный силами притяжения, и песчинка поворачивается. Продолжающееся движение такого вида приводит к скатыванию песчинки вниз на другие частицы до тех пор, пока она не окажется плотно упакованной.

Когда частица глины падает на другие частицы глины, при соприкосновении с покоящейся частицей возникают силы притяжения. Сила тяжести продолжает увлекать падающую частицу вниз, создавая крутящий момент, который стремится вращать ее относительно точки соприкосновения с покоящейся частицей. Однако частицы глины настолько легки, что крутящий момент силы тяжести не в состоянии вызвать вращение падающей частицы. Таким образом, она сохраняет ту ориентацию, которую имела при первом соприкосновении с покоящейся частицей. При падении следующих частиц они тоже остаются там, куда упали. В результате упаковка частиц оказывается неплотной.

При сжатии влажного или сухого песка его форма изменяется только в том случае, если песчинки скользят относительно друг друга. Допустим, что к влажному песку приложено давление, недостаточно сильное, чтобы вызвать относительное движение песчинок. Площадь соприкосновения двух прижимаемых друг к другу песчинок увеличивается, при этом возрастают и электрические силы, отталкивающие эти частицы друг от друга. В центре площади соприкосновения дополнительное давление на песчинки необратимо деформирует их поверхности. Энергия, за-



Ионная модель воды



Связывание воды

траченная на эту деформацию, не может быть получена обратно после снятия давления. Однако большая часть энергии, затрачиваемой на сжатие песчинок, расходуется на деформацию области, окружающей центр площади контакта, а такая деформация является обратимой. Эта энергия накапливается в форме потенциальной энергии упругой деформации, подобно тому как накапливается энергия при сжатии пружины.

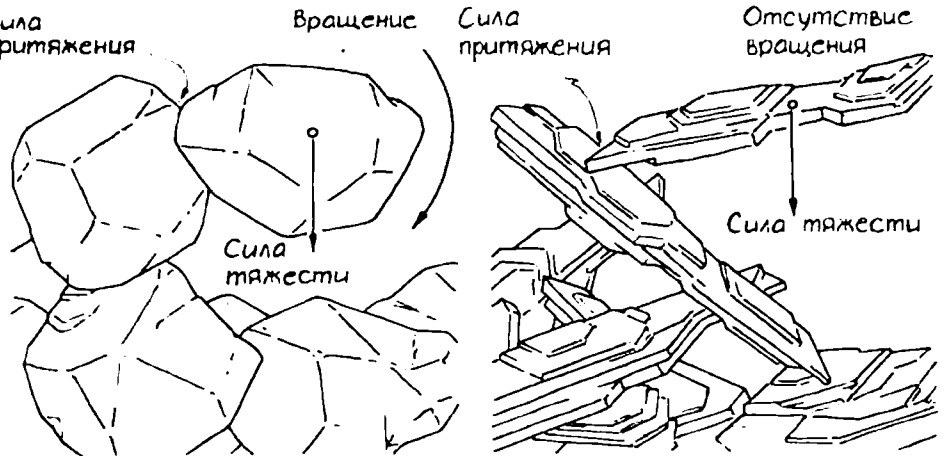
При снятии давления силы упругости отталкивают песчинки друг от друга. Дополнительные электрические силы, возникающие во время расширения площади соприкосновения между частицами, сравнительно невелики и легко преодолеваются отталкивающимися песчинками. Таким образом, после снятия давления песчинки принимают свою прежнюю форму.

Нечто иное происходит при сжатии влажной глины. Рассмотрим неплотную структуру частиц глины, схематически изображенную на рисунке. Приложенная сила деформирует одну из пластинчатых частиц таким образом, что ее конец, прежде свободный, теперь прикасается к другой частице. В точке соприкосновения двух частиц силы притяжения связывают их между собой. При устранении приложенной силы частицы остаются связанными, потому что связывающие их силы достаточно велики, чтобы удерживать частицы в изогнутой конфигурации. Когда вы нажимаете кончиками пальцев на влажную глину, ее структура деформируется. После того как прекратится сдавливание, она не восстанавливает исходную форму. Такие вещества называют пластичными. Влажная глина пластична, но этого нельзя сказать о влажном песке.

Лучший песок для постройки песочных замков содержит небольшую примесь глины. Выбирайте песок поближе воды, чтобы он был уже достаточно влажным. Песок с самого края воды, по-видимому, слишком влажен и поэтому недостаточно прочен. Кроме того, если вы построите замок у самой воды, его быстро разрушат волны или прилив.

Песочные замки можно строить разными способами. Влажный песок можно осторожно вываливать из сосуда, так что он сохранит форму сосуда. Сосуд интересной формы позволяет создавать интересные постройки. Песку можно придавать желаемую форму, утрамбовывая его между двумя досками. Таким способом удобно лепить длинные стенки замков. Сложнее делать из влажного песка скульптуру. Постройте высокий холмик из песка и затем, начиная сверху, удаляйте все лишнее. Существует и другой способ, имитирующий рост сталагмитов в карстовых пещерах: из сложенной шепотью руки выпускают тонкую струйку жидкого песка. Струйка позволяет получить тонкий шпиль, напоминающий колокольню модернистского собора.

Если вы хотите сохранить построенный замок в течение жаркого дня, периодически обрызгивайте его, чтобы он сохранял прочность. Капли воды просачиваются между песчинками, электрические поля которых смешивают средние положения протонов в молекулах воды и связывают воду. Повышенная вязкость воды обеспечивает устойчивость структуры до тех пор, пока не понадобится новое обрызгивание.



Упаковка частиц песка (слева) и глины (справа)

Хотя песок не изменяет объем при высыхании, он расширяется при резком сжатии, проявляя свойство, называемое дилатансией. Возможно, вы обращали внимание на это свойство, проходя по полюсу песка, только что смоченного волной. Перед тем как вы ступили на песок, он выглядит влажным, но становится сухим сразу после этого. Лишь спустя некоторое время следы снова становятся влажными.

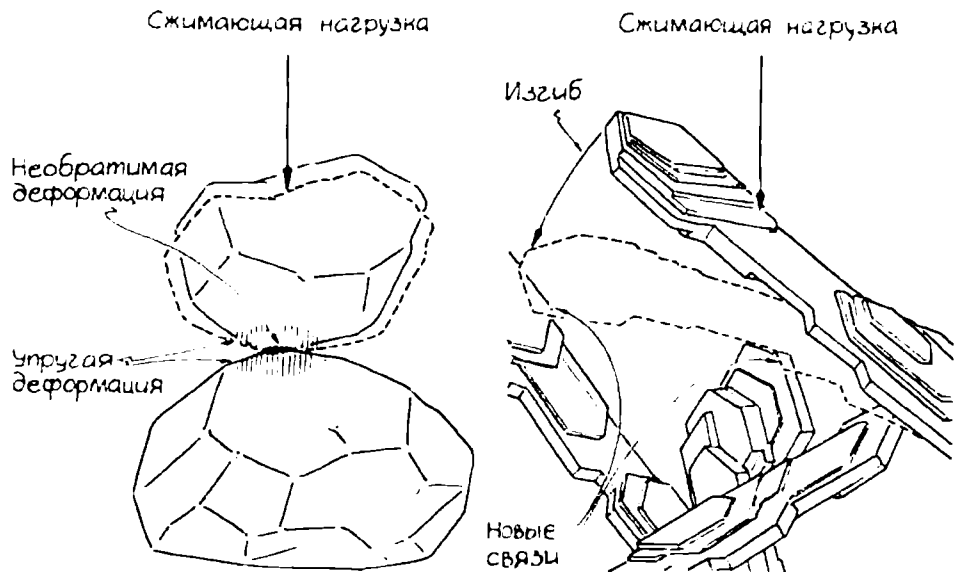
Влажная глина не высыхает, когда на нее наступают, потому что ее частицы упакованы неплотно. Всякое давление на глину сильнее сближает ее частицы, уменьшая объем. Дилатансия характерна для плотно упакованных частиц. Когда на частицы внезапно начинает действовать давление, заставляющее их двигаться, они получают возможность перемещаться лишь в том случае, если возрастает их среднее расстояние друг от друга. Когда нога нажимает на мокрый песок, его расширение достигает поверхности песчаного слоя. Вода не поспевает за этим расширением песка и лишь через несколько минут просачивается на его поверхность.

Дилатансия проявляется также в способности сухого песка осыпаться. Это важное свойство можно наблюдать на простом опыте. Постепенно наклоняйте совок с песком, пока песок не потечет из

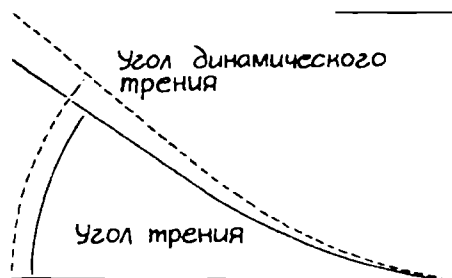
совка. Осыпание начинается, когда наклон поверхности песка превысит определенный угол, называемый углом динамического трения. Соскользнувший песок уменьшает наклон до угла (называемого углом трения), при котором поверхность становится устойчивой. Если снова наклонить совок, наклон поверхности песка снова превысит угол динамического трения и произойдет новое осыпание.

При углах наклона поверхности, не достигающих угла трения, песчинки на склоне устойчивы, потому что они плотно упакованы. Частицы начинают скользить лишь при условии, что угол наклона поверхности достигает угла динамического трения. Песчинкам сначала приходится приподняться, чтобы они могли соскользнуть или скатиться по нижележащим песчинкам. Общая перегрузка песка достигает состояния дилатансии, и он соскальзывает со склона.

Многие гранулярные вещества осыпаются приблизительно таким же образом. Общезвестным примером является снег. Помимо песка я изучал сахар (рафинированный песок и сахарную пудру), соль, крахмал и порошок какао, а также сыпучесть сухих бобов, апельсина и яблок. Все они имеют характерные угол трения и угол динамического трения.



Поведение песка (слева) и глины (справа) при сжатии



Характерные углы осыпания

В случае песка разность между этими двумя углами достигает приблизительно пяти градусов. Когда я обрызгивал песок водой, песчинки переставали скатываться с наклонной поверхности. Вместо этого при достаточно сильном наклоне совка весь песок сразу соскальзывал с него. В случае бобов разность между двумя углами составляет около четырех градусов. Крахмал и порошок какао обладают настолько большой сцепляемостью, что это очень затрудняет измерения.

Когезионные свойства (сцепляемость) имеют многие порошки; их частицы слипаются и сопротивляются течению. В некоторых случаях, например для косметической пудры, сцепляемость является желательным свойством, позволяющим пудре удерживаться на своем месте. В других случаях, например для соли и порошка какао, повышенная сцепляемость нежелательна. Когезионные свойства порошков определяются разнообразными электрическими силами.

Одна из этих сил имеет электростатическое происхождение и обусловлена наличием зарядов на поверхности соседних частиц. Самыми большими из электростатических являются кулоновские силы отталкивания между частицами с зарядами одного знака и силы притяжения между частицами с зарядами противоположного знака. Слабее силы притяжения, возникающие между заряженной частицей и нейтральными (незаряженными) атомом либо молекулой. Электрическое поле заряженной частицы вызывает разделение заряда внутри атома или молекулы. Например, если частица заряжена отрицательно, то положительно заряженная составляющая нейтрального атома или молекулы несколько смещается в сторону частицы, а отрицательно заряженная составляющая — в противоположном направлении. Хотя атом или молекула по-прежнему остаются нейтральными, вокруг них теперь создается поле электрического диполя, способствующее их притяжению к заряженной частице.

Некоторые молекулы являются постоянными электрическими диполями и поэтому притягиваются к другим таким же молекулам, находящимся рядом; отрицательный конец одной молекулы притягивается к положительному концу другой. Вандерваальсовы силы принадлежат к числу электрических сил родственного происхождения, но они обусловлены квантовой природой атома. Хотя атом может быть электронейтральным и не является постоянным диполем, он может стать диполем в какие-то моменты времени. В простой модели атома Бора считается, что электрон движется вокруг ядра по некоторой орбите; следовательно, в каждый момент времени он находится по одну сторону от ядра и, таким образом, отделен от положительного заряда.

Такой мгновенный диполь может индуцировать диполь на соседнем нейтральном атоме. При появлении двух дипольных полей происходит взаимное притяжение атомов.

Любые две соприкасающиеся поверхности притягиваются друг к другу за счет вандерваальсовых сил. Все предметы окружающего нас мира не слипаются только в результате кулоновского отталкивания, которое препятствует сближению их поверхностей. Многие известные порошкообразные вещества обладают когезионными свойствами в результате действия вандерваальсовых сил между их частицами.

При соприкосновении таких частиц силы трения препятствуют их скольжению друг относительно друга. Если между частицами имеется вода, то их сцепляемость может быть обусловлена ее связыванием заряженными участками на поверхности частиц. Определенную роль в возникновении когезионных свойств может играть и поверхностное натяжение при наличии воздуха между частицами или в том случае, если внешняя сторона «лешетки» из порошка удерживается как единое целое водой.

Даже подробные сведения о структуре частиц порошкообразного вещества позволяют сделать лишь самые общие предсказания когезионных свойств. Например, трение между частицами неправильной формы, по-видимому, должно быть более сильным, однако лишь при условии, что они соприкасаются между собой. Когезия порошка часто снижается, если его частицы размалываются на более гладкие частицы с более правильной формой. Когезия может также измениться, если порошок высушивают, в результате чего уменьшается роль воды между его частицами. Сжатие порошкообразного вещества обычно повышает когезию, поскольку при этом возрастают вандерваальсовы силы и силы электростатического притяжения, и, кроме того, увеличивается число точек соприкосновения и зацепления частиц. Вообще говоря, чем меньше зернистость порошка, тем более сильными когезионными свойствами он обладает. Допустим, вы приготовили порошок, частицы которого приблизительно одинаковы по размеру. Затем порошок поместили в сосуд с открывающимся дном круглого сечения, из которого он может высыпаться. Для измерения скорости высыпания вы измеряете время, которое уходит на то, чтобы наполненный сосуд опустошился до определенного уровня.

Когда частицы порошка очень малы, скорость их высыпания из сосуда очень низка или вообще равна нулю. На них действуют большие силы когезии, удерживающие частицы от перемещения относительно друг друга. Если переходить к порошкам с последовательно увеличивающимся размером частиц, то скорость высыпания порошка возрастает, но, достигнув определенного максимума, снова уменьшается. Когда диаметр частиц становится равным приблизительно пятой части диаметра выходного отверстия, высыпание частиц прекращается. При этом условии частицы мешают друг другу проходить через отверстие, образуя в нем нечто подобное сухой каменной кладке.

В некоторых порошках образуются комки, которые удерживаются как единое целое благодаря наличию воды между ча-

стицами. Форма слоев из молекул воды между частицами порошка принадлежит к одному из трех типов. Если частицы порошка сначала были совершенно сухими, то вода образует между участками соприкосновения частиц так называемую пендулярную структуру. Другие участки между частицами заполнены воздухом. При наличии большого количества воды заполненные ею области увеличиваются, но все еще разделяются воздушными перемычками. Такая структура называется фуникулярной. Если пространство между частицами полностью заполнено водой, то структура называется капиллярной. Природа сил, удерживающих комки частиц как единое целое, установлена еще не полностью. Прочность таких комков часто приписывают поверхностному натяжению воды; такая модель может быть удовлетворительной для описания пендулярных и фуникулярных структур. Как бы то ни было, для любой из трех структур важную роль играет связывание воды.

Порошок может затвердевать, даже если большая его часть является сухой. Возможно, вы замечали, что, когда для приготовления горячего какао в порошок наливают воду, он иногда так затвердевает, что не поддается растворению. Такой затвердевший порошок сухой внутри, но влажный снаружи. Когда большой комок затвердевшего порошка какао плавает на поверхности воды, его края постепенно осыпаются в воду.

Затвердевание порошка происходит в том случае, если вода между его частицами на внешней стороне комка оказывается слишком вязкой (вследствие связывания) и затрудняет впитывание дополнительного количества воды. В этом явлении определенную роль могут играть и силы притяжения между частицами порошка. В конце концов между частицами порошка просачивается такое количество воды, что их электрические поля уже не способны связывать всю воду или обеспечивать сильное притяжение частиц. В таком случае комок распадается. Однако еще долгое время после того, как основная масса комка растворилась и исчезла, от нее остаются отдельные слипшиеся комочки более мелких размеров.

Влажный крахмал подобен многим другим влажным порошкам, однако его вязкость зависит от давления, оказываемого на смесь. Он является примером так называемой ньютоновской жидкости — класса жидкостей, свойства которого автор обсуждал ранее в этой же рубрике журнала «Сайентифик Америкн», вышедшего в ноябре 1978 г. Крахмал относится к тиксотропным веществам, а это означает, что его вязкость возрастает при повышении давления.

Я растворил небольшое количество крахмала, скатал его в шарик и затем периодически изучал по мере высыхания. Сначала твердость шарика зависела от давления, оказываемого на смесь. Когда я нажимал на шарик, он был очень твердым и выглядел сухим. Когда я устранял давление, шарик немедленно начинал течь и выглядел влажным. По мере того как вода испарялась из смеси, шарик делался все тверже, пока его поверхность не становилась совершенно твердой на ощупь. Он легко разрушался даже при небольшом скручивающем усилии, но не поддавался никакому давлению на его поверхность.

Поскольку частицы крахмала очень мя-

лы, его свойства можно объяснить модельными представлениями об электрических взаимодействиях во влажной глине. Мне не очень понятно, почему эта смесь является тиксотропной. Простейшее объяснение заключается в том, что повышение вязкости обусловлено связыванием воды между частицами. Когда сжимают шарик из крахмала, его частицы сближаются. Молекулы воды между ними становятся менее подвижными, поскольку они теперь еще более приближаются к частицам крахмала. В результате данная область шарика становится намного более вязкой, чем была до тех пор, пока на нее не оказывалось давление.

Большая часть порошков, обладающих когезионными свойствами, способна и к адгезии; поэтому они прилипают к пальцам рук или к кухонной утвари. Какие именно из многочисленных электрических сил играют определяющую роль в явлениях адгезии, бывает трудно установить. Обычно эту роль играют вандерваальсовы силы, иногда в сочетании с некоторыми электростатическими силами. Если частицы порошка увлажнены и достаточно велики, то удовлетворительное объяснение адгезии возможно на основе учета поверхностного натяжения воды.

Если тонкоизмельченный порошок даже незначительно увлажнен из-за наличия влаги в помещении, его прилипание к вашим пальцам, по-видимому, в какой-то степени обусловлено связыванием воды между пальцами и отдельными частицами порошка. На поверхности частицы имеется слой воды, несущий избыточный отрицательный заряд.

Немного дальше от частицы находится слой воды, несущий избыточный положительный заряд. Когда эта система приближается к какой-либо поверхности, скажем к поверхности пальца, электрическое поле положительно заряженного слоя воды вызывает появление отрицательного заряда на поверхности пальца. Частица прилипает к пальцу из-за кулоновского взаимодействия между соседними заряженными слоями. Поверхность частицы заряжена положительно; слой воды, прилегающий к частице, заряжен отрицательно; слой воды, более удаленный от частицы, заряжен положительно. Поверхность пальца заряжается отрицательно.

Адгезия такого типа сильна только при условии, что частицы порошка имеют размеры порядка нескольких микрон. Значительно большие частицы, вероятно, слишком тяжелы, чтобы прилипать к пальцу. Не прилипают к нему и частицы намного меньших размеров, но здесь дело уже не в их весе. Меньшие частицы способны окружать себя более широкими слоями связанной воды, поскольку они не настолько хорошо создают на своей поверхности гельмоглицев двойной слой зарядов. Вследствие того что частицы меньшего размера не в состоянии настолько приблизиться к пальцу, как более крупные частицы, окруженные более тонким слоем связанной воды, их адгезия оказывается недостаточно сильной. Если бы адгезия была не столь селективной, жизнь оказалась бы слишком неудобной, особенно в дождливые дни. Все, к чему бы мы ни прикоснулись, прилипло бы к пальцам наших рук, поскольку вода между ними и любыми частицами оказалась бы связанной.

Кен Бейнес, Френсис Пью. ИСКУССТВО КОНСТРУИРОВАНИЯ

THE ART OF THE ENGINEER, by Ken Baynes and Francis Pugh. The Overlook Press, distributed by the Viking Press (\$ 75)

АРХИТЕКТУРА ПАЛЛАДИО И ЕЕ ВЛИЯНИЕ. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК PALLADIO'S ARCHITECTURE AND ITS INFLUENCE: A PHOTOGRAPHIC GUIDE, photographs by Joseph C. Farber, text by Henry Hope Reed. Dover Publications, Inc. (\$ 6.95)

**В**ро все технологические процессы того времени прекрасно изображены на сотнях больших гравюр, оттиснутых с медных форм. Эта традиция не была новой — простые механизмы, вычерченные Леонардо да Винчи, и сегодня считаются шедеврами. На многих с любовью оформленных иллюстрирующих книги можно видеть горняков и каменщиков, артиллеристов и землемеров со всеми их хитроумными инструментами. На занимающей две страницы чудесной гравюре, снабженной множеством примечаний и обозначений, изображена «машина для подъема воды силой огня»; эта машина была изготовлена Ньюкоменом в Лондоне в 1725 г. Перед нами примеры и искусства, и конструирования — но это еще не искусство конструирования.

Разграничение названных понятий — главная тема рассматриваемой нами отличной оформленной книги. Своим появлением она обязана выставке, экспонаты которой демонстрировались около двух лет назад в Кардиффе и Лондоне и подробно описаны в книге. Пояснительный текст и выполненный в хронологическом порядке обзор иллюстрирующих его набросков, чертежей, планов и фотографий служат оригинальным вкладом в историю техники. Все эти предшественники подлинного искусства конструирования могут быть использованы в системе технического образования. И действительно, их назначение — обучение читателя, а отнюдь не руководство для успешного изготовления конкретного изделия. О таком назначении иллюстраций свидетельствует множество признаков: масштаб и материалы часто не указываются как не имеющие большого значения; немалое место на иллюстрациях занимает обычно изображение самого мастера или рабочего; нечеткое изображение отдельных деталей затрудняет понимание принципа их работы.

Искусство же конструирования связано именно с изготовлением изделия. Как по форме, так и по существу оно охватывает огромный диапазон; с одной стороны, блокноты конструкторов, выполненные для себя эскизами и набросками, в которых основное внимание уделено обычно новым и трудным конструктивным решениям, с другой — демонстрационные чертежи, выполненные для уже изготовленного изделия. Эти чертежи носят празднично-торжественный характер, но они служат и практическим целям; нередко они лежат в основе работ по модификациям и ремонту. Между этими двумя границами находятся проектные чертежи, дающие общее представление о проекте и близкие к рабочим чертежам, но выполненные в соответствии с установленными правилами менее детализованно. Затем следуют так называемые технологические

чертежи. В них последовательно и подробно отражены все операции изготовления деталей изделия (нередко это делается в определенном порядке с использованием некоторых чертежных методов пространственного изображения). Сущность подлинного искусства конструирования в том, что оно служит наглядным руководством по изготовлению изделия, причем работу выполняет большое число людей, а не один или два опытных мастера. «Способность выполнять эту задачу лежит в основе конструирования».

С учетом всего этого можно сказать, что подлинное искусство инженера-конструктора, приведшее к серьезному успеху, начинается с тщательно выполненных чертежей М. Баултона и Дж. Уатта из Сохо (Бирмингем), с первой фабрики, изготовлявшей стационарные паровые машины (1773 г.). Уатт создал свой стиль. Более десяти лет он выполнял чертежи у себя дома, используя услуги всего лишь одного помощника. Паровые машины проектировались тогда по заказам, причем здание машинного отделения составляло часть проекта, а некоторые детали приходилось изготавливать на соседних предприятиях. Уатт так много работал за чертежной доской, что его партнер роптал, когда приходилось конструировать небольшие машины — они отнимали много времени, а доход приносил мизерный. Чертежам Уатта посвящено несколько страниц «Искусства конструирования»; некоторые из них многоцветные, причем цвета условно обозначают не только материалы деталей, но и выполняемые деталями функции. Один взгляд на эти чертежи — и становится ясно, что появилось новое искусство.

У паровых машин были предшественники — корабли, которые уже давно строились по чертежам. Корабельные плотники в своем мастерстве упорно придерживались традиций, и большинство работ волей-неволей приходилось доверять самим исполнителям. На бумаге вычерчивались только довольно общие формы и габариты. Но даже такие корабельные чертежи восходят в Великобритании ко времени флота королевы Елизаветы. Относящиеся к середине XVIII в. планы напоминают больше научные трактаты, нежели рабочие чертежи. Корабельные плотники не были сторонниками централизованного проектирования.

Объем книги не позволяет, конечно, охватить все области конструирования. Основное внимание уделено машиностроительным конструкциям транспортной промышленности. Правда, это ограничение сильно проявляется лишь начиная со второй половины XIX в. Пароходы, локомотивы, а несколько позднее и самолеты — вот наиболее сложные машины того времени. Их конструкции носят индивидуальный и изменчивый характер, что, естественно, способствует развитию черчения. Вершина искусства конструирования — это, несомненно, «Грейт Истерн», «великий корабль», который построил Исамбард Кингдом Брунелль и который в книге представлен также многими фотографиями. Поистине уникальна групповая фотография: важные особы в цилиндре и черных модных пальто (один из господ держит в руках рулон чертежей). Группа

наблюдает за спуском корабля на воду, который состоялся в 1857 г. и сопровождался, как известно, неприятностями. Большие литографии корабля, «показывающие искусство чертежника в апогее его мастерства», необычны. Раскрашенные вручную и иногда даже воспроизводящие структуру материала, педантично и тщательно вычерченные разрезы корабля занимают по несколько страниц книги. Такие чертежи создавались в течение, вероятно, 5 — 10 лет несколькими специально подготовленными художниками, постоянно работавшими на судостроительной верфи. В конечном счете работа над этими чертежами велась с целью заручиться поддержкой общественности, и в то же время чертежи должны были подбодрить членов совета директоров, которые начинали испытывать сомнения относительно прибыльности их предприятия.

Имеются убедительные свидетельства того, что борьба между искусными мастерами и конструкторами велась вплоть до появления стальных кораблей. Брунелли требовал выполнения работ в полном соответствии с его детализированными чертежами. (Например, использования в некоторых балках кают деревянных винтов вместо стальных болтов. «Мне эти винты необходимы», — заявлял он). В кораблестроении (а позднее — в самолетостроении) можно заметить длительный переходный период, в течение которого металл вытесняет дерево, а искусные мастера теряют свое традиционное влияние и уступают позиции конструкторам и станкам.

За последние 15 лет процесс специализации и передачи ряда функций машинам нанес удар по чертежным бюро. Книга заканчивается чертежами транспортного реактивного самолета VC10, разрабатывавшегося в середине 60-х годов английской авиационной фирмой «Виккерс» и предназначавшегося для длительных беспосадочных полетов. Надо сказать, что для этого самолета было выполнено около 50 000 технологических чертежей. Изменяется характер работ, и чертежи отражают это изменение. На смену сборке деталей приходит обработка слитка на станке с цифровым управлением. Объединение деталей в узел выходит из-под контроля сборщика.

Но даже в самом чертежном бюро чертежники избавлены теперь от утомительной проработки многочисленных вариантов — этим занимаются микропроцессоры и графопостроители. Однако эти облегчающие труд устройства лишают процесс создания технологии его наглядности, увлекательности, красоты. Понимание конструкции наступает на более абстрактном уровне, более того, чертежи вновь приобретают характер технических инструментов. В книге помещено несколько чудесных страниц, последовательно изображающих различные геометрические формы. На одной такой странице показаны относящиеся к 1850 г. 80 запатентованных конструкций колес, используемых в паровой машине локомотива и вагонной тележки, — столько же вариантов на тему круга, сколько можно найти в коллекции маргариток и астр. Несколько страниц отведено технологическим чертежам аэроплана BE 2C, выпускавшегося в 1914 г. Королевским авиационным заводом Ве-

ликобритании. Совершенно ясно, что этот биплан изготавливался еще из дерева и парусины руками плотников и швей.

Вторая книга, «Архитектура Палладио и ее влияние», представляет собой альбом фотографий изумительных пилонов и портиков, созданных жившим в Падуе каменщиком Андреа ди Пьетро делла Гондола. Каменщик быстро вырос в маститого архитектора, а затем стал автором знаменитых «Четырех книг об архитектуре»\*. (Эти книги также выпущены недолгим изданием в издательстве Dover Publication.) «Четыре книги» открыли всему миру то неповторимое чувство римской архитектуры, которым обладал их автор. (Его покровитель из Виченцы граф Джанджорджо Триссино, желая сравнить своего любимца с греческой богиней мудрости Афиной Палладой, дал архитектору новое имя — Палладио.) В альбоме представлены лучшие виллы, построенные Палладио, а также две церкви и необычный театр, действующие и в наши дни. Книжки Палладио помогали архитекторам и за пределами его страны и эпохи. Здания, построенные по «Четырем книгам», можно встретить далеко от Виченцы — в районах Уайтхолла, Коvent-Гардена, Белого Дома, Монтчелло и Шарлотсвилла, все они своими куполами, пилонами и потолками заставляют вспомнить эпоху императора Адриана. Нарисованные тушью замыслы архитектора воплощаются затем в железе и алюминии; еще более изящны творения из камня, кирпича и цветной штукатурки.

В альбоме приведены отличные фотографии 29 итальянских зданий; их дополняют фотографии 3 оригинальных английских и американских строений, создатели которых изучали «Четыре книги» или комментарии к ним. Сейчас наблюдается возрождение палладианства. Иллюстрации в альбоме и введение, написанное одним из компетентных и энергичных современных сторонников этого классического стиля, послужат читателю основой для понимания стиля Палладио. Проживая в Венеции XVI в. больше чем кто-либо другой следовал законам античности, и все же «он пользуется наибольшим вниманием со стороны приверженцев современной архитектуры». Два камня с фантастическим орнаментом и лепными либо высеченными из камня головами чудовищ, разинувших пасти, — поразительные фигуры, созданные Бартоломео Ридолфи в одном из дворцов Виченцы. Не эта ли нарушенная симметрия и лежит в конечном счете в самой основе стиля?

*Стивен Джей Гулд. ИЗМЕРЕНИЯ СПОСОБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА: ЛОЖНЫЕ ОЦЕНКИ THE MISMEASURE OF MAN, by Stephen Jay Gould. W. W. Norton and Company, Inc. (\$ 14.95)*

**П**ОСТРОЕННАЯ на скрупулезном анализе фактов, эта убедительная летопись предрассудков в науке написана увлекательно, как детективная история, но порой мрачна, точно повесть о реальном преступлении. Благодаря талантливой манере изложения книга от начала до конца читается с неослабевающим интересом. Содержание ее обобщает эпиграф, в

\* Четыре книги об архитектуре. М., 1938 (на русск. яз.) — *Прим. ред.*

качестве которого взяты слова молодого Дарвина: «Как же велик наш грех, если страдания бедняков протекуют не от законов природы, а от установленных порядков».

Кто же виноват? Главным образом ученые профессора, как знаменитые, так и малоизвестные. Натуралист Жан Луи Агассис, швейцарец по происхождению, заговорил о разделении человечества на расы, понаблюдав чернокожих слуг в флиладельфийской гостинице. В одном из писем (опубликовано в сокращенном виде; рукопись хранится в Гарварде) Агассис выражает крайнее отвращение к неграм (не хочется цитировать здесь эти строки), призывая в заключение: «Упаси нас боже иметь с ними дело!» Статьи Агассиса, написанные авторитетным языком естествознания, и до и после освобождения негров использовались для защиты политики жесткой сегрегации. Не менее известен французский ученый Поль Брока. Он определял ценность человека по весу его мозга. Брока доказывал, что белые мужчины — самые совершенные люди, так как мозг у них наибольший. Обнаружив, что мозг немцев весит больше, чем мозг французов, Брока ввел в расчеты особые поправки, правда, почему-то он начисто забыл о поправках на вес тела, когда собирал данные о женщинах.

Врач Чезаре Ломброзо пошел более сложным путем. Он занимался не только мозгом, а всем организмом человека, пытаясь найти черты обезьян у тех людей, которые оказались на дне общества. Ломброзо утверждал, что есть прирожденные преступники и что с точки зрения эволюции они являются отсталыми существами. Отдельные места из работ Ломброзо сейчас трудно принимать всерьез, но в свое время влияние его идей было, несомненно, велико. (По ломброзовскому типу прирожденного преступника был создан образ графа Дракулы: орлиный нос, косматые брови, заостренные уши). Отметим еще атавистические татуировки и изборождения по-обезьяньи цепкой стопы преступники.

Как видим, поначалу в книге можно найти и комическое, однако далее речь идет о вещах более современных и более серьезных. Мы вступаем в царство КИ, т.е. коэффициента интеллекта — единственного в своем роде численного показателя интеллектуальных способностей человека. В концепции генетически фиксированного интеллекта КИ считают постоянным и наследственно обусловленным, кроме того, ему придают социальное значение. Теория КИ особенно распространялась в США, хотя изобрели этот показатель во Франции. Преподаватель Сорбонны Альфред Бине решил с помощью психологических тестов отделить детей, способных к учению, но ленивых и не желающих учиться, от страдающих врожденными дефектами. Ранее Бине занимался краниометрией, но она его разочаровала: «Идея измерять интеллект, измеряя череп, абсурдна». Проводить большее число коротких тестов в виде задач как бы случайного, незначительного содержания — такой методикой решил пользоваться Бине. Как теоретик он не заблуждался в оценке своего метода, сознавая его эмпиричность. Понимал Бине и то, что интеллект невозможно выразить каким-то одним числом. Бине опасался давать



людям какую-либо оценку, избегал беспочвенных предсказаний. Он вовсе не собирался распределять учащихся на группы по уровню развития, а хотел лишь отобрать самых слабых, нуждающихся в помощи. Бине не искал пределы, а стремился показать возможности.

Последователи Бине в США не приняли во внимание его оговорки на этот счет. Авторы, работы которых мы здесь обсуждаем, в наше время почти забыты, иные давно изменили точку зрения, а их заблуждения продолжают жить. Так, откасался от своих прежних взглядов Г. Годдард, который ввел понятие «слабоумный» и говорил о наследовании слабоумия. В книге Годдарда приводились фотографии «келликеков» (так по фамилии одной «слабоумной» семьи, историю которой проследил Годдард, стали называть людей, страдающих «наследственным слабоумием» из числа пациентов больницы Годдарда в графстве Джерси. По мнению экспертов, фотографии были подретушированы, причем, по современным меркам, довольно грубо; чтобы создать нужное впечатление, придурковатость физиономий усилили.

Во время первой мировой войны в армии были распространены альфа-тесты, которые представляли собой приспособленные для «массового потребления» тесты Бине. Однако сами же организаторы тестов в конце концов разглядели их взятость и сознательное злоупотребление фактическим материалом. После войны появилась монография молодого профессора Принстонского университета С. Бриггема об альфа-тестах, о которой с похвалой отзывался Р. Йеркс, преподаватель Гарвардского университета, а прежде полковник — во время войны он руководил проведением психологических тестов в армии. В 1930 году Бриггем заявил в печати, что его попытки исходя из КИ выявить расовые различия были непоследовательными с точки зрения методики эксперимента и, более того, ошибочными по существу: «Одно из самых претенциозных сравнительных исследований о расах (т.е. работы самого Бриггема) совершенно не обосновано». Это выразительное признание было сделано слишком поздно. Акт об ограничении иммиграции обрел силу закона. «Америка для американцев», — сказал президент Кулидж, подписывая законопроект, который сводил к минимуму иммиграцию из Южной, Центральной и Восточной Европы. От этого закона пострадали граждане европейских государств, для которых закрылся путь в США, — многие стали жертвами нацизма, взявшего на вооружение евгенику и теорию тестов. Так эти идеи оказались идейной базой фашизма.

В самой лучшей главе книги идет речь о факторном анализе. Эта глава начинается с истории сэра Сирила Берта, который всех превзошел в мошенничестве и фальсификации. Берт был ведущим английским факторологом своего времени. Метод факторного анализа состоит в построении умозаключений из статистических корреляций между разноплановыми измерениями. Гулд дает ясное представление об этой методике, не обращаясь к алгебре, а с помощью простых и убедительных геометрических доказательств — прекрасный образец популярной математики.

Между приверженцами английской школы, которые признавали только один коэффициент интеллекта (грубо говоря, некое среднее от всех измерений), и ее противником, американцем Л. Терстоном, долго не прекращался спор. На основании тестов Терстон строил сеть векторов в абстрактном пространстве с целью показать позитивную корреляцию между тестами на различные способности; однофакторный подход английской школы предполагал отрицательную корреляцию для множества не столь важных измерений. Методика Терстона позволяет получить не один коэффициент, а несколько «векторов ума».

Терстон был, очевидно, прав: единственный показатель — это просто артефакт, результат произвольных допущений, хотя, если уж на то пошло, то же можно сказать и о наборах векторов. Корреляция здесь ни при чем. К примеру, профессор Гулд обнаружил, что стоимость бензина почти идеально коррелирует с его, Гулда, возрастом. Выводы из набора формальных показателей не следует приводить как доказательство верности той или иной теории идеальности. Один из известнейших в настоящее время американских специалистов по наследственности до сих пор оценивает интеллект с помощью одного только G-фактора (от general — генеральный) Спирмена.

Человек мог родиться умным или глупым, детство его могло протекать в благоприятных условиях или, напротив, быть полным лишений — все это определяет успех или неудачу при выполнении тестов, однако находится за пределами статистики. Так, наивные теории не выдерживают испытания реальностью.

Разновидности человека, возможно, и развились бы когда-нибудь в самостоятельные виды, сильно отличающиеся генетически, но для этого прошло бы слишком мало времени. Местные вариации в частоте генов до сих пор значительно превышают вариации между расами (это видно на примере хорошо изученных антигенов клеток крови). Некоторые внешние различия между расами, конечно, очевидны. По существу незначительные, они трактовались с социальной точки зрения.

Вряд ли мозг можно приспособить для какой-либо другой деятельности, кроме обучения. Мы всего лишь «обучающиеся животные», нам еще учиться и учиться.

*Ф. Моррисон*

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

*А. Шоу*

## ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Перевод с английского

«Операционные системы ЭВМ относятся к числу самых сложных систем, созданных человеком, и только недавно мы смогли понять и по достоинству оценить эту сложность. Книга рассказывает о принципах операционных систем, причем особое внимание в ней уделено мультипрограммированию. Я попытался описать концепции и аппарат, требуемые для проектирования и понимания этих систем, а не обсуждать подробно, как некоторая операционная система реализована на машине; однако для иллюстрации применения частных принципов в книге приводится много примеров реальных систем. Заголовок «Логическое проектирование» подчеркивает мою заинтересованность в логической организации и взаимодействии элементов операционных систем, а также в методах их «обоснования»».

(Из предисловия автора)

Книга предназначена для студентов, изучающих вычислительную технику, и специалистов, владеющих основами знаний организации ЭВМ, языка ассемблера, языков программирования и структур данных.

1981, 20 л. Цена 1р. 70к.

Эту книгу вы можете приобрести в магазинах книоторгов, 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)



## КВАЗАРЫ — ЗОНДЫ УДАЛЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ И РАННИХ СТАДИЙ НАШЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

QUASI-STELLAR OBJECTS. Geoffrey Burbidge and Margaret Burbidge. W. H. Freeman and Company, 1967.

THE CLUSTERING OF GALAXIES. Edward J. Groth, P. James E. Peebles, Michael Seldner and Raymond M. Soneira in *Scientific American*, Vol. 237 No. 5, pages 76 — 98; November 1977.

QUASARS, OBSERVED PROPERTIES OF OPTICALLY SELECTED OBJECTS AT LARGE REDSHIFTS. Malcolm G. Smith in *Vistas in Astronomy*, Vol. 22, pages 321 — 362, 1978.

OBJECTS OF HIGH REDSHIFT. George O. Abell and P. J. E. Peebles. D. Reidel Publishing Co. 1980.

## СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ

PIPELINE ARCHITECTURE. C. V. Ramamoorthy and H. F. Li in *Computing Surveys*, Vol. 9, No. 1, pages 61 — 102; March, 1977.

A SURVEY OF PARALLEL MACHINE ORGANIZATION AND PROGRAMMING. D. J. Kuck in *Computing Surveys*, Vol. 9, No. 1, pages 29 — 60; March, 1977.

VECTOR PROCESSING ON THE CYBER 200. M. J. Kascic. Control Data Corporation, 1979.

PERSPECTIVES ON LARGE-SCALE SCIENTIFIC COMPUTATION. Garry Rodrigue, E. Dick Giroux and Michael Pratt in *Computer*, Vol. 13, No. 10, pages 65 — 80; October, 1980.

SECOND GENERATION OF VECTOR SUPERCOMPUTERS. Edward W. Kozdrowicki and Douglas J. Theis in *Computer*, Vol. 13, No. 11, pages 71 — 83; November, 1980.

## МАГИЯ МАТЕМАТИКИ

BIOCHEMISTRY. Albert L. Lehninger. H. S. Worth, 1970.

BIOCHEMISTRY. Lubert Stryer. W. H. Freeman and Company, 1975.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF THE GENE. James D. Watson. W. A. Benjamin, 1976.

## ЛАЗЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

CO<sub>2</sub> LASERS: EFFECTS AND APPLICATIONS. W. W. Duley, Academic Press, 1976.

HIGH POWER LASER WELDING — 1978. Conrad M. Banas in *Optical Engineering*, Vol. 17, No. 3, page 210; May — June, 1978.

BASIC CHARACTERISTICS OF LARGE OUTPUT HIGH — ENERGY DENSITY HEAT SOURCES. Y. Arata in *Proceedings of the International Laser Processing Conference*, Anaheim, Calif. November 16 — 17, 1981.

## МАССОВЫЕ ВЫМИРАНИЯ ПОЗДНЕГО МЕЗОЗОЯ

CRETACEOUS-TERTIARY EXTINCTIONS AND POSSIBLE TERRESTRIAL AND EXTRATERRESTRIAL CAUSES. PROCEEDINGS OF WORKSHOP NOVEMBER 16 AND 17, 1976. K-TEC Group. National Museum of Natural Sciences, 1976.

AN EXTRATERRESTRIAL EVENT AT THE GREYACEOUS-TERTIARY BOUNDARY. J. Smit

and J. Hertogen in *Nature*, Vol. 285, No. 5762, pages 198 — 200; May 22, 1980.

EXTRATERRESTRIAL CAUSE FOR THE CRETACEOUS-TERTIARY EXTINCTION, Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro and Helen V. Michel in *Science*, Vol. 208, No. 4448, pages 1095 — 1108; June 6, 1980.

## РЕГЕНЕРАЦИЯ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ ИЗ ПРОТОПЛАСТОВ КЛЕТОК ЛИСТА

POTATO PROTOPLASTS IN CROP IMPROVEMENT. James F. Shepard, Dennis Bidney and Elias Shahin in *Science*, Vol. 208, No. 4439, pages 17 — 24; April 4, 1980.

PROTOPLASTS AS SOURCES OF DISEASE RESISTANCE IN PLANTS. James F. Shepard in *Annual Review of Phytopathology*, Vol. 19, pages 145 — 166; 1981.

## ОНКОГЕНЫ

CANCER: SCIENCE AND SOCIETY. John Cairns. W. H. Freeman and Company, 1978.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF RNA TUMOR VIRUSES: A PHYSICIAN'S GUIDE. J. Michael Bishop in *The New England Journal of Medicine*, Vol. 303, No. 12, pages 675 — 682; September 18, 1980.

PROTEINS PHOSPHORYLATED BY THE RSV TRANSFORMING FUNCTION. T. Hunter in *Cell*, Vol. 22, No. 3, pages 647 — 648; December, 1980.

ENEMIES WITHIN: THE GENESIS OF RETROVIRUS ONCOGENES. J. Michael Bishop in *Cell*, Vol. 23, No. 1, pages 5 — 6; January, 1981.

## ДРЕВНИЙ ГРЕЧЕСКИЙ ГОРОД В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

LA VIELLE ROUTE DE L'INDE DE BACTRES À TAXILA. A Foucher in *Mémoires de la Délégation Archéologique française en Afghanistan*. Les éditions d'art et d'histoire. 1942 — 47.

THE GREEKS IN BACTRIA AND INDIA. William W. Tarn. Cambridge University Press, 1951.

ANCIENT ART FROM AFGHANISTAN TREASURES OF THE KABUL MUSEUM. Benjamin Rowland. Asia Society, distributed by H. N. Abrams. 1966.

THE DYNASTIC ARTS OF THE KUSHANS. Jan M. Rosenfield University of California Press, 1967.

L'ORIENT HELLÉNISÉ. D. Schumberger A. Michel. 1969.

## КОРОТКАЯ ЖИЗНЬ ЭВАРИСТА ГАЛУА

LA VIE D'ÉVARISTE GALOIS. Paul Dupuy in *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*. Vol. 13, pages 197 — 266, 1896.

ÉCRITS ET MÉMOIRES MATHÉMATIQUES D'ÉVARISTE GALOIS. Edited by Robert Bourgne and J.-P. Azra. Gauthier-Villars, 1962.

ÉVARISTE GALOIS. René Taton in *Dictionary of Scientific Biography*, edited by Charles Coulston Gillispie. Charles Scribner's Sons, 1972.

GENIUS AND BIOGRAPHERS: THE FICIONALIZATION OF ÉVARISTE GALOIS. Tony R. Rothman in *The American Mathematical*

*Monthly*, Vol. 89, No. 2, pages 84 — 106; February, 1982.

Э. Галуа. Сочинения. Под ред. Н. Г. Чеботарева. — М. — Л.: ОНТИ, 1936.

А. Дальма. ЭВАРИСТ ГАЛУА, РЕВОЛЮЦИОНЕР И МАТЕМАТИК. — М.: Физматгиз, 1960.

Л. Инфельд. ЭВАРИСТ ГАЛУА. ИЗБРАННИК БОГОВ. — М.: Молодая гвардия, 1958. Э.

Белл. ТВОРЦЫ МАТЕМАТИКИ. ПРЕДШЕСТВЕННИКИ СОВРЕМЕННОЙ МАТЕМАТИКИ. — М.: Просвещение, 1979.

## НАУКА ВОКРУГ НАС

ATOMISTIC APPROACH TO THE RHEOLOGY OF SAND-WATER AND OF CLAY-WATER MIXTURES. W. A. Weyl and W. C. Ormsby in *Rheology Theory and Applications*. Vol. 3, edited by Frederick R. Eirich. Academic Press, 1960.

THE COHESIVENESS OF POWDERS. N. Pilpel in *Endeavour*, Vol. 28, No. 104, pages 73 — 76; May, 1969.

THE PHYSICS AND MECHANICS OF SOIL. Ronald F. Scott in *Contemporary Physics*, Vol. 10, No. 5, pages 449 — 472; September, 1969.

CRUMB FORMATION. N. Pilpel in *Endeavour*. Vol. 30, No. 110, pages 77 — 81; May, 1971.

## В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 22.12.82

По оригинал-макету

Формат 60 × 90/8. Бум. офсетная № 1

Гарантируемые Тираж, Гелиос

Офсетная печать. 13,00 усл.-печ. л.,

18,84 уч.-изд. л., 36,60 усл. кр.-отт.

Изд. № 36/2661. Заказ 422

Тираж 20000 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в релакции по подготовке оригинал-макета издательства «Мир» на фотонаборном комплексе «Компьюграфик»

Типография В/О Внешторгиздат Главиздатэкспорта Госкомиздата СССР 127349, Москва, И-349, Илимская, 7



Издательство МИР предлагает:

Ян Линдبلاد

## МИР КНИГИ ДЖУНГЛЕЙ

Перевод с шведского



Имя шведского писателя-анималиста Яна Линдبلاد не нуждается в рекламе. Своими книгами о живой природе этот автор завоевал признание и симпатии миллионов читателей во всем мире. Большой популярностью пользуются созданные им фильмы о животных. В 1977 г. Ян Линдبلاد приступил к съемкам телевизионного фильма о природе Индийского субконтинента. Литературным итогом этой работы стала книга «Мир Книги джунглей», которая предлагается вниманию читателей в русском переводе.

Вместе с автором читатель совершает увлекательное путешествие по крупнейшим охраняемым территориям Индии и Шри Ланки. В целом создается представление об основных типах естественных ландшафтов Индийского субконтинента и их животном мире. Перед нами яркая, выразительная подборка рассказов о жизни наиболее типичных зверей и птиц. В ткань этих рассказов ма-

стерски вплетено популярное изложение некоторых существенных научных проблем, в частности о системах трофических связей, о симбиозе, о цветовом зрении у животных и т.д. Особо стоит отметить новую трактовку образа жизни хищных животных. Хищники прежде рассматривались только в плане их опасности, кровожадности и т.п., однако в последнее время ученые все чаще говорят о положительной роли хищных зверей в системе экологического равновесия.

Название книги навеяно знаменитой двухтомной книгой английского писателя Редьярда Киплинга, созданной специально для детей. Пожалуй, книгу Линдبلاد можно было бы назвать и иначе:

«Что осталось от мира „Книги джунглей“».

Мысль о необходимости охраны природы, столь актуальная сегодня, будет сопровождать читателя на протяжении всей книги.

1983. 128 страниц, с иллюстрациями

Цена 4 р. 50 к.



*В следующем номере:*

---



**СОВРЕМЕННЫЕ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ  
В ОТКРЫТОМ МОРЕ**

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО  
РЕЗОНАНСА В МЕДИЦИНЕ**

---

**КОСМИЧЕСКИЕ ВЫБРОСЫ—ИХ РОЛЬ  
В ИЗУЧЕНИИ ВСЕЛЕННОЙ**

---

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ СО СВЕРХДЛИННЫМИ  
БАЗАМИ В РАДИОАСТРОНОМИИ**

---

**НАСКАЛЬНЫЕ РОСПИСИ И ДРУГИЕ СЛЕДЫ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА, ОБНАРУЖЕННЫЕ  
В ДРЕВНЕЙ ПЕЩЕРЕ ЛАСКО**

---

**КОМПОНЕНТЫ ПИЩИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФУНКЦИИ МОЗГА**

---

**ГИГАНТСКИЕ КАЛЬМАРЫ—ЧТО МЫ О НИХ ЗНАЕМ**

---

**ГРИГОРИАНСКИЙ КАЛЕНДАРЬ И ИСТОРИЯ ЕГО ВВЕДЕНИЯ**

---

**«МАГИЧЕСКИЕ» СВОЙСТВА КУБИКА РУБИКА  
И ДРУГИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЛ**

---

**АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ БАЛЕРИНЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ  
ЗАКОНОВ МЕХАНИКИ**