

В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Декабрь **12** 1987

СЛЕДУЮЩАЯ
КОМПЬЮТЕРНАЯ
РЕВОЛЮЦИЯ

Издательство МИР предлагает:

Органик Э.
**ОРГАНИЗАЦИЯ
СИСТЕМЫ ИНТЕЛ 432**
Перевод с английского



Рассматривается новая вычислительная система Интел 432, построенная на базе 32-разрядного микропроцессора и представляющая собой выдающееся достижение микроэлектроники и вычислительной техники. Имея малые габариты, она обладает высокой производительностью

и широкими функциональными возможностями, какими обладают современные большие ЭВМ. На Интел 432 осуществлена аппаратная реализация языка высокого уровня Ада.

Для специалистов, работающих в области вычислительной техники.

1987, 26 л. Цена 2 р. 20 к.



В МИРЕ НАУКИ

Scientific American · Издание на русском языке

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА

№ 12 · ДЕКАБРЬ 1987

В номере:

(Scientific American, October 1987, Vol. 257, No. 4)

СТАТЬИ

- 6 Следующая компьютерная революция *Эйбрахам Пилед*
Менее чем за 50 лет компьютеры стали неотъемлемым атрибутом современного индустриального общества. На следующем этапе их мощь возрастет по крайней мере на порядок, они станут повсеместно распространенным средством решения интеллектуальных задач
- 16 Архитектура компьютеров *Джеффри К. Фокс, Пол К. Мессина*
Обычные компьютеры решают задачу последовательно, шаг за шагом. Высокопроизводительные компьютеры могут работать одновременно над несколькими частями задачи подобно бригаде рабочих, в которой разделение труда позволяет быстрее выполнить работу
- 26 Микросхемы для компьютеров *Джеймс Д. Мейндл*
В 1959 г. на одном кристалле размещали один транзистор, сейчас — более миллиона. По мере того как полупроводниковая технология приближается к пределу своих возможностей, темпы роста уровня интеграции замедляются, однако к 2000 г. уже появятся кристаллы, содержащие миллиард компонентов
- 36 Современное программирование *Дэвид Гелеритер*
Параллельные компьютеры ставят перед нами серьезную проблему: Они требуют программ, которые одновременно выполняют множество действий. Как организовать «пчелиный рой» этих действий, чтобы свести их в единое целое?
- 46 Технология хранения данных *Марк Х. Крайдер*
Через пять лет дисковые магнитные устройства будут записывать и считывать данные вдвое быстрее и хранить в пять раз больше информации по сравнению с сегодняшними устройствами. Магнитооптическая техника сможет обеспечить еще более высокую плотность записи
- 58 Человеко-машинные интерфейсы *Джеймс Д. Фоли*
Почему общаться со сложными компьютерами должно быть непременно трудно? Суперкомпьютеры следующего поколения будут способны в деталях создавать «искусственные реальности», которые облегчат взаимодействие человека с машиной
- 66 Компьютерные сети *Роберт Е. Кан*
Компьютеры, объединенные в сеть, могут «общаться» и совместно пользоваться программами, данными и дорогостоящим аппаратным обеспечением. Для создания такой сети одних физических каналов связи недостаточно — компьютеры должны понимать друг друга
- 76 Вычислительные системы для научных исследований *Пит Хат, Джеральд Джей Сассмен*
Вычислительные эксперименты на компьютерах обогащают методику научных исследований. В этой области они начинают играть столь же важную роль, как теория, наблюдения и лабораторные эксперименты
- 86 Вычислительные системы для медицины *Гленн Д. Реннелс, Эдвард Г. Шортлиф*
В будущем компьютеры станут столь же привычными в медицинской практике, как сейчас стетоскоп. Они смогут хранить и выдавать по запросу необходимую информацию, а также оказывать помощь медицинскому персоналу в вопросах диагностики и лечения
- 96 Вычислительные системы для автоматизации производства *Альберт М. Эрисман, Кеннет В. Невис*
Суперкомпьютеры могут стать важным элементом промышленного проектирования. Уже сейчас они оказывают существенное влияние на конструкцию самолетов и автомобилей, помогая улучшить их аэродинамические характеристики

РУБРИКИ

- 3 Об авторах
5 50 и 100 лет назад
45, 56, 74, 85,
104, 115, 122 Наука и общество
100 Занимательный компьютер
- 106 Наука вокруг нас
118 Книги
125 Библиография
127 Перечень статей за 1987 г.

SCIENTIFIC AMERICAN

Harry Myers
PUBLISHER

Jonathan Piel
EDITOR

BOARD OF EDITORS

Philip Morrison
BOOK EDITOR

Armand Schwab, Jr.
Timothy Appenzeller
Timothy M. Beardsley

John M. Benditt, Laurie Burnham
David L. Cooke, Jr.

Ari W. Epstein
Gregory R. Greenwell

John Horgan

Robert Kunzig, James T. Rogers
Ricki L. Rusting, Karen Wright

Samuel L. Howard
ART DIRECTOR

Richard Sasso
DIRECTOR OF PRODUCTION

Georg-Dieter von Holtzbrinck
PRESIDENT

Gerard Piel
CHAIRMAN OF THE BOARD

© 1987 by Scientific American, Inc.

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

В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Л. В. Шепелева

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

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ
М. М. Попова
М. В. Суrowова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ
Т. Д. Франк-Каменечкая
ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР
Н. А. Вавилова

ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ
М. Г. Жуков

ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ
В. В. Ефимов

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

© перевод на русский язык и оформление, «Мир», 1987

На обложке



СЛЕДУЮЩАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

На обложке изображена «электронная перчатка», которая дает пользователям компьютера возможность с помощью собственных рук манипулировать изображениями на графическом дисплее (см. статью Джеймса Д. Фоли «Человеко-машинные интерфейсы» на с. 58). Через интерфейс-перчатку компьютер опознает движения пальцев и генерирует соответствующие тактильные ощущения. Отдельный (здесь невидимый) датчик определяет положение и ориентацию руки. Компьютер изготовлен фирмой Symbolics Inc.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Jon Brenneis

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
6	Armando Garcia, IBM Corporation, Thomas J. Watson Research Center	51-53	Ian Worpole	81	Kitt Peak National Observatory (вверху), Gabor Kiss (внизу)
8	Johny Johnson	54	IBM Corporation	82	Gerald Jay Sussman
10	IBM Corporation, Thomas J. Watson Research Center	58	NASA/Ames Research Center	83	Gabor Kiss
12, 13	James Kilkelly	60	Scott S. Fisher, Douglas E. Kerr, Amy F. Wu и Warren J. Robinett, NASA/Ames Research Center	87	Larry Fagan и Mark Friss
16	Jon Brenneis	62	Scott S. Fisher, Douglas E. Kerr, Amy F. Wu и Warren J. Robinett, NASA/Ames Research Center	88	Edward Bell
18-22	Jerome Kuhl	63	James Kilkelly	89	Doris Wells-Papanek и Michael Kahn (вверху), Andrew Christie (внизу)
27	Jon Brenneis	64	Sunil K. Mukerjee и Ali Balali, George Washington University	90	Cliff Wulfman
28	Steve Allen, courtesy of The Fairchild Semiconductor Corporation	66	Carol Donner	91	Randy Miller, University of Pittsburgh School of Medicine
29-35	Hank Iken	67	BBN Communication Corporation	92	Edward Bell
36	Animals, Animals/Holt Studios, Ltd.	68-72	George V. Kelvin, Science Graphics	93	Andrew Christie
38-43	Joan Starwood	76	James Kilkelly	96	Boeing Computer Services Co.
46	Control Data Corporation	78, 79	Kitt Peak National Observatory (слева), Gabor Kiss (справа)	98, 100	Gabor Kiss
48, 49	Ian Worpole	80	Piet Hut (вверху слева), Gabor Kiss (вверху справа и внизу)	101	Boeing Computer Services Co.
50	W. J. Harley, E. I. du Pont de Nemours & Co., Inc., (слева и в середине); A. Corradi, Magnax, Inc. (справа)	102	Boeing Commercial Airplane Co.	106	Michael Goodman
		107	James Kilkelly	108, 109	Michael Goodman
		110-112	Andrew Christie		

Об авторах

Abraham Peled (ЭЙБРАХАМ ПИЛЕД «Следующая компьютерная революция») — вице-президент по вопросам разработки и эксплуатации систем и директор отделения кибернетики и информатики в научно-исследовательском отделении Research Division фирмы IBM. Степени бакалавра и магистра наук получил в Технологическом институте в Израиле, а степени магистра искусств и доктора философии — в Принстонском университете. В IBM работает с 1974 г., когда он поступил в Исследовательский центр Томаса Уотсона этой корпорации. После работы в других исследовательских центрах той же фирмы Пилед в 1983 г. вернулся в центр Уотсона в качестве директора по техническому планированию и руководству работами, проводимыми исследовательским отделением корпорации. Настоящую должность Пилед занимает с 1985 г., возглавляя отделение кибернетики и информатики центра Уотсона, а также курируя исследовательские центры и лаборатории фирмы IBM в других странах.

Geoffrey C. Fox, Paul C. Messina (ДЖЕФФРИ К. ФОКС, ПОЛ К. МЕССИНА «Архитектура компьютеров») участвовали в создании вычислительных машин, основанных на параллельной обработке, для Калифорнийского технологического института (КТИ). Фокс, профессор физики и заместитель декана факультета вычислительной техники, возглавлял объединенную группу исследователей из КТИ и Лаборатории реактивного движения, изучавших перспективы применения параллельных вычислительных систем в научных исследованиях. Мессина руководит в КТИ аналогичной темой, называемой Concurrent Supercomputing Initiative (CSIC); ее целью является создание параллельных вычислительных машин, не уступающих по производительности обычным суперкомпьютерам. Фокс занимался математикой в Кембриджском университете в Великобритании, а докторскую диссертацию в 1967 г. защитил в этом университете уже по теоретической физике. Поработав некоторое время в различных учебных и научно-исследовательских учреждениях Англии и США, в 1970 г. пришел в КТИ, где в 1979 г. получил звание профессора. Мессина в 1965 г. закончил Вустерский колледж, получив степень бакалавра, в 1967 г. стал магистром, а в 1972 г. защитил докторскую диссертацию в Университете в Цинциннати, где он

также руководил университетским вычислительным центром. Закончив обучение, поступил в Аргоннскую национальную лабораторию, где в 1982 г. возглавил отдел математики и программирования. Этой весной Мессина был назначен руководителем проекта CSIC.

James D. Meindl (ДЖЕЙМС Д. МЕЙНДЛ «Микросхемы для компьютеров») — вице-президент по научным вопросам и проректор Ренселлеровского политехнического института. Окончил Университет Карнеги—Меллона и в 1985 г. получил степень доктора философии в области электротехники. Работал в фирме Westinghouse Electric Corporation и в лаборатории электроники сухопутных войск США. В 1967 г. стал ассистентом кафедры электротехники в Станфордском университете, в 1970 г. получил должность профессора. С 1972 по 1986 г. был директором лаборатории электроники Станфордского университета. В 1986 г. перешел в Ренселлеровский институт. Первая его статья о микросхемах в журнале «Scientific American» была опубликована в 1977 г.

David Gelernter (ДЭВИД ГЕЛЕРНТЕР «Современное программирование») — доцент кафедры информатики в Йельском университете. Завершив обучение в этом университете, он защитил докторскую диссертацию по информатике в Университете шт. Нью-Йорк в Стоуни-Бруке. По его словам, интерес к языкам программирования и параллельным вычислениям первоначально зародился у него в связи с поиском средств для создания новых программных структур, в частности для задач искусственного интеллекта, но затем заинтересовался ими вплотную. Гелернтера и сейчас продолжают занимать проблемы искусственного интеллекта, в особенности его приложения в медицине, а также в моделировании памяти. В настоящее время в издательстве W. W. Norton & Co готовится к выходу в свет его книга «Лингвистика программирования» (Programming Linguistics).

Mark H. Kryder (МАРК Х. КРАЙДЕР «Технология хранения данных») — профессор кафедры электроники и вычислительной техники Университета Карнеги—Меллона. Учился в Станфордском университете, где в 1965 г. ему была присуждена степень бакалавра, а затем в аспирантуре Калифорнийского технологического ин-

ститута, где в 1966 г. получил звание магистра, а в 1970 г. — доктора наук. Проработав два года по обмену специалистами в Западногерманском университете в Регенсбурге, он поступил в Исследовательский центр Томаса Уотсона фирмы IBM. В 1978 г. он перешел в Университет Карнеги—Меллона, где в 1980 г. ему присвоили звание профессора. С 1982 г. Крайдер работает в должности директора университетского исследовательского центра по магнитной технике.

James D. Foley (ДЖЕЙМС Д. ФОЛИ «Человеко-машинные интерфейсы») — профессор информатики Университета Джорджа Вашингтона, изучает применение методов экспертных систем к человеко-машинным интерфейсам. Степень бакалавра получил в 1964 г. в Университете Лихая, а степени магистра (1965 г.) и доктора философии (1969 г.) — в Мичиганском университете. Через год стал доцентом информатики в Северо-Каролинском университете, где Фредерик П. Брукс-младший познакомил его с перспективами создания «искусственных реальностей». В 1976 г. перешел в Бюро переписи США, чтобы проектировать системы для графического представления статистики. Через год вернулся в Университет Джорджа Вашингтона. Фоли — соавтор книги «Основы интерактивной машинной графики» и член Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике.

Robert E. Kahn (РОБЕРТ Е. КАН «Компьютерные сети») — президент некоммерческой Корпорации для Национальных исследовательских инициатив, которую он основал в прошлом году с целью содействия исследованиям в области обработки информации. Степень бакалавра получил в 1960 г. в колледже при Нью-Йоркском университете, а степени магистра (1962) и доктора философии (1964) по электротехнике в Принстонском университете. После двух лет работы в качестве доцента в Массачусетском технологическом институте перешел в фирму Bolt, Beranek and Newman, Inc., где участвовал в создании сети ARPANET. В 1972 г. Кан перешел в Управление перспективных исследований министерства обороны США (DARPA), где впоследствии стал руководителем отдела технологии обработки информации.

Piet Hut, Gerald Jay Sussman (ПИТ ХАТ, ДЖЕРАЛЬД ДЖЕЙ СУССМЕН «Вычислительные системы для научных исследований»). Хат — профессор астрофизики в Институте выс-

ших исследований, Сасмен — профессор электротехники Массачусетского технологического института (МТИ). Они ведут совместную работу по созданию средств вычислительной техники, ориентированных на проведение астрофизических исследований. Хат получил степень магистра в Утрехтском университете, а степень доктора философии — в Амстердамском университете. С 1980 г. он стал сотрудником Института высших исследований. В 1985 г. Хат изучал астрофизику в Калифорнийском университете в Беркли. Проявляя интерес к японскому языку и культуре, он сотрудничает с японскими специалистами во многих областях — от физики элементарных частиц, геофизики и палеонтологии до информатики. Сасмен получил диплом в 1968 г. и степень доктора философии в области математики в 1973 г. в МТИ, где он до этого уже работал сотрудником Лаборатории искусственного интеллекта. Сасмен — один из авторов учебника по основам вычислительной техники.

Glenn D. Rennels, Edward H. Shortliffe (ГЛЕНН Д. РЕННЕЛС, ЭДВАРД Г. ШОРТЛИФ «Вычислительные системы для медицины») ведут совместную работу в группе медицинских компьютерных систем в Медицинской школе Станфордского университета. Реннелс получил степень бакалавра в 1977 г. в Дартмутском колледже, степень доктора медицины в 1980 г. в Дартмутской медицинской школе, степень доктора философии по медицинской информатике в 1986 г. в Станфордском университете (Шортлиф был его научным руководителем). В настоящее время он сотрудник Медицинской школы Станфордского университета, практикует как анестезиолог. Шортлиф получил степень бакалавра в 1970 г. в Гарвардском колледже, затем прошел курс подготовки к научно-исследовательской работе в области медицины в Станфордском университете, где получил степени доктора медицины (1975 г.) и доктора философии (1976 г.) по медицинской информатике. Его докторская диссертация была посвящена разработке компьютерной программы, использующей правила вывода, для консультирования по вопросам лечения бактериальных заболеваний. В Медицинской школе Станфордского университета он с 1979 г. занимал должность ассистента, с 1985 г. — доцента; помимо научной работы занимается врачебной практикой.

Albert M. Erisman, Kenneth W. Neves

(АЛЬБЕРТ М. ЭРИСМАН, КЕННЕТ В. НЕВИС «Вычислительные системы для автоматизации производства») — сотрудники компании Boeing Computer Services, где Эрисман занимает пост директора отделения Engineering Technology Applications, а Невис руководит научно-исследовательскими программами для отделения Engineering Scientific Services. Эрисман получил степень доктора по прикладной математике в Университете шт. Айова в 1969 г. и поступил на работу в фирму Boeing. Специализируется на разработке алгоритмов для научных исследований и алгоритмов

для анализа крупномасштабных схем, таких как системы электроснабжения. Невис, который имеет степень доктора философии в области математики, присужденную ему Аризонским университетом, работал в корпорации IBM и в отделении Nuclear Power Generation компании Babcock & Wilcox, где занимал должность старшего математика. В 1975 г. поступил в фирму Boeing. Среди его разработок имеется вычислительная программа, которая эффективно работает во взаимодействии с современными рабочими станциями и параллельными процессорами.

Издательство **МИР** предлагает:

Р. Токхейм

ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Перевод с английского

0111	1001	0010	0110
7	9	2	6

Р. Токхейм **Основы
цифровой
электроники**

Издательство «Мир»

Последовательное и сжатое изложение принципов действия и возможностей практически всех видов цифровых элементов и устройств. Рассматриваются вентильные логические схемы, способы двоично-десятичного кодирования, принципы действия и построения логических и

арифметических модулей, архитектура и ЗУ микрокомпьютеров, а также методы сопряжения цифровых и аналоговых устройств.

Для инженеров, желающих использовать цифровую аппаратуру, и студентов, изучающих электронную технику.

1987, 22 л. Цена 1 р. 90 к.



SCIENTIFIC AMERICAN

ОКТАБРЬ 1937 г. Несмотря на грандиозные проекты по использованию энергии падающей воды для выработки электричества, основным «поставщиком» электроэнергии остается водяной пар. В прошлом году на долю паровых турбин пришлось около 70% из тех 109 млрд. киловатт-час, которые были произведены в США.

Мышьяк, сильный яд для большинства организмов, служит пищей некоторым микробам. Другие микробы питаются ядовитым селеном. Это лишь два примера, когда химический элемент необходим для существования одних организмов, но смертельно опасен для других. Одна из великих загадок науки о живом состоит в том, почему организм использует только некоторые химические элементы, в то время как остальные из общего числа около 90 элементов, известных химикам, для него бесполезны, а то и вовсе ядовиты? Возникает и такой вопрос: действительно ли человек «обходится» примерно 15 элементами или для его существования нужны и другие? Вспомним об открытии витаминов: не повторится ли здесь такая же история?

Инженеры из Иллинойского университета в Эрбане обнаружили, что в их климате затраты на охлаждение семикомнатного дома в летний период можно снизить до 50 центов в день. Этот вывод был подкреплен экспериментально, причем во время испытаний температура наружного воздуха колебалась от 30 до 40 °С.

Недавно выяснилось, что вопреки бытующему мнению Мэттью Бренди, известный фотограф, участвовавший в Гражданской войне, был не первым, кто заснял батальные сцены. Эта честь принадлежит неизвестному герою, сделавшему дагерротипы в 1847 г. во время Мексиканской войны.

В Нью-Йорке утверждены новые правила строительства. Среди мер, направленных на то, чтобы довести методы строительства до современного уровня, значится и разрешение использовать при сооружении стальных конструкций сварку вместо клепки. Это решение устраняет последнее препятствие на пути к широкому ис-

пользованию сварки при строительстве зданий.



ОКТАБРЬ 1887 г. В интервью, данном газете «Evening Post», Томас Эдисон заявил, что в настоящее время он всецело поглощен идеей коммерческого использования фонографа. Применения усовершенствованного фонографа настолько необычны, что публика, как опасается изобретатель, ему просто не поверит. Однако новый аппарат, по его словам, столь прост в обращении и столь удобен, что его быстрое внедрение не вызывает сомнений. Эдисон сказал следующее: «Коммерсант или служащий, желающий послать письмо, должен лишь включить аппарат и проговорить текст письма в трубку. После этого пластинка, или, как я называю ее, «фонограмма», готова для отправки по почте. Адресат вставляет ее в свой аппарат и слышит сообщение, причем гораздо яснее и отчетливее, чем по самому совершенному телефону. Много возможностей сулит фонограф и музыкантам, если иметь в виду незначительную стоимость получения копий фонограммы и высокое качество воспроизведения музыки на аппарате».

Машинопись революционизирует методы обмена сообщениями и создает новые рабочие места, заполняемые энергичными и квалифицированными молодыми особами. Искусство диктовки до сих пор было малоизвестно, но сейчас деловые люди начинают осознавать, как много времени они

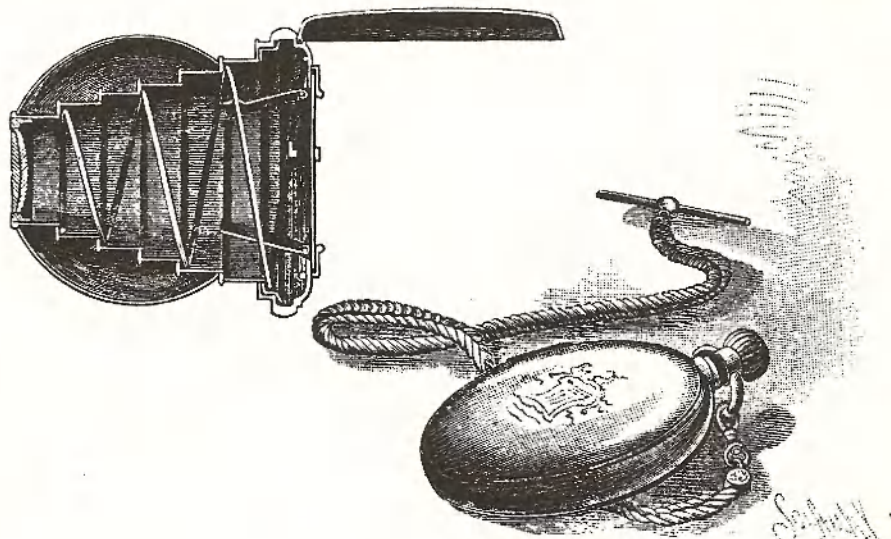
потравили на рутинную работу писания деловых бумаг от руки.

Долгое время считалось, что фотография верно служит фальшивомонетчикам. Теперь, однако, отношение к ней должно измениться: М. Гобер из Французского банка нашел способ заставить это искусство выступить в роли детектива. Предложенный им метод состоит в получении увеличенных до большого размера фотографий монеты или ценной бумаги, вызывающих подозрение. При этом легко обнаруживается любое повреждение или отклонение от норм.

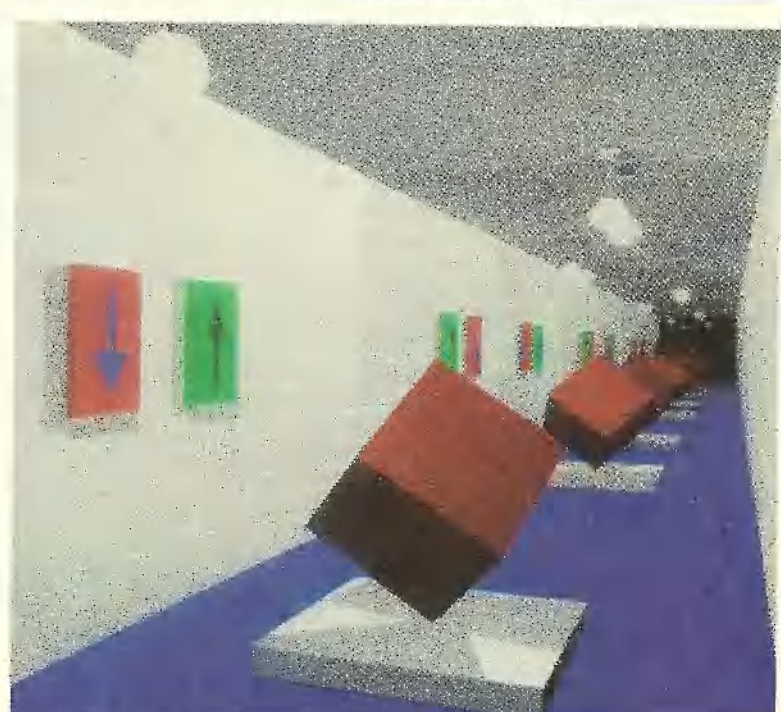
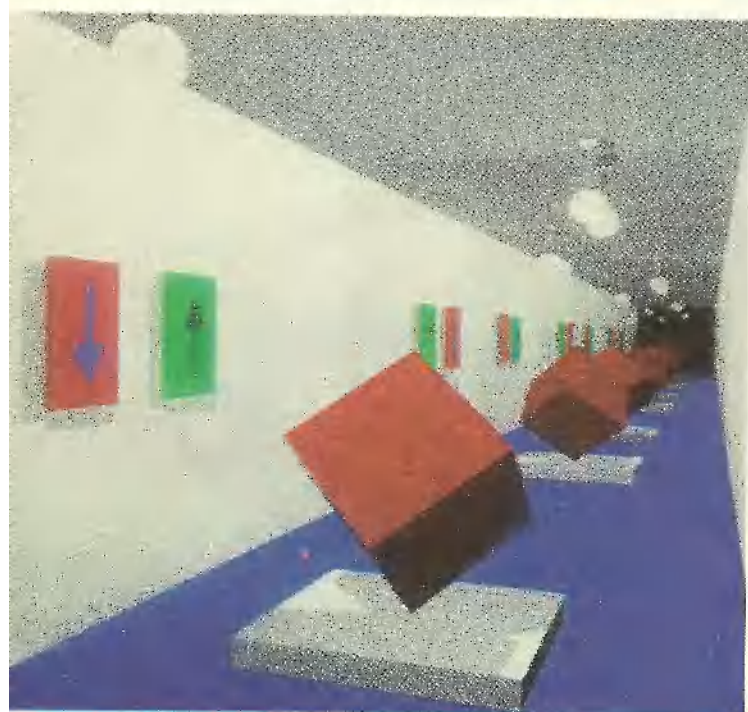
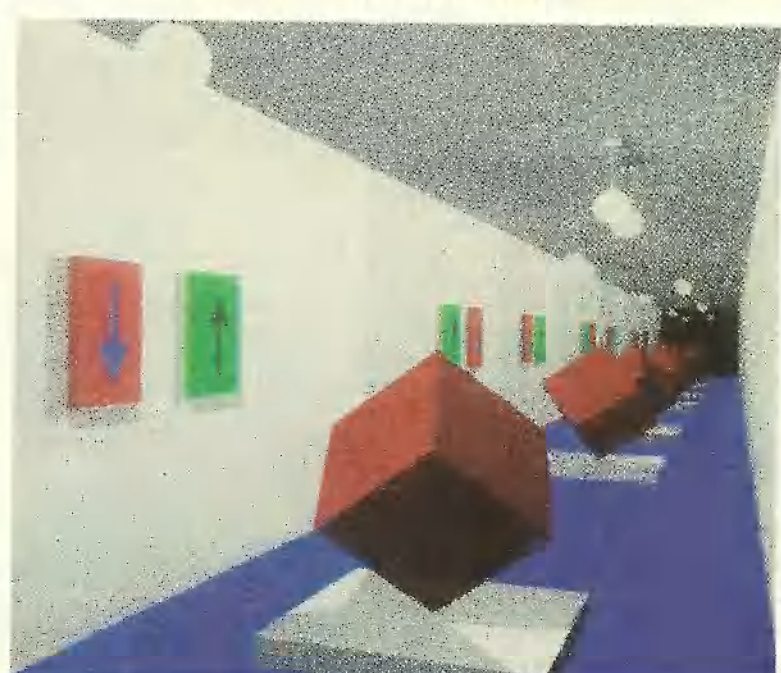
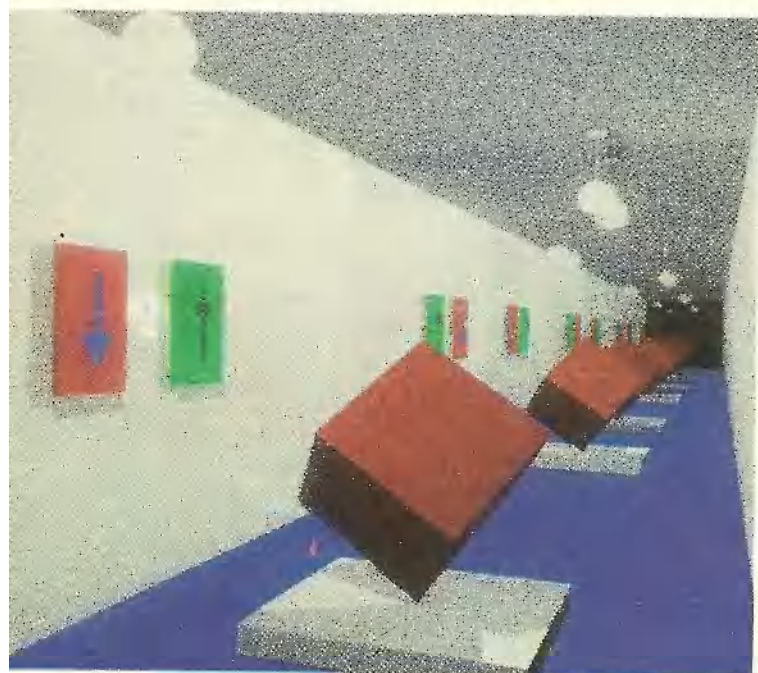
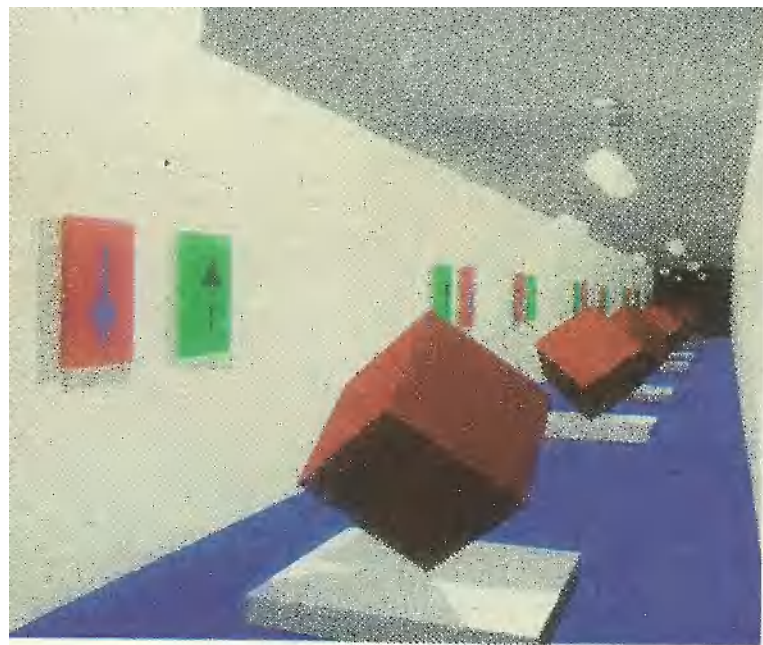
Что касается применения электричества для городского транспорта, то здесь таятся огромные возможности. Ближе время, когда с улиц исчезнут конки, и электричество позволит нам передвигаться по городу быстрее и за меньшую плату.

На первом этапе соревнований на Кубок Америки этого сезона, 27 сентября, победила американская яхта «Volunteer». Она на 20 мин опередила яхту из Великобритании «Thistle». Второй этап гонок, 30 сентября, также был выигран яхтой «Volunteer», имеющей преимущество хода по ветру. Итак, кубок останется у нас.

Ни одна из предлагавшихся конструкций миниатюрных фотографических аппаратов не может сравниться с той, что изображена на рисунке внизу. Мы не видим причин, по которым нельзя было бы объединить с помощью специальных приспособлений часовую механизм и фотографическую камеру. При этом одним нажатием кнопки, останавливающей часы, можно было бы, например, заснять окончание забега на скачках.



Фотокамера-часы



Следующая КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Менее чем за 50 лет компьютеры стали неотъемлемым атрибутом современного индустриального общества. На следующем этапе их мощь возрастет по крайней мере на порядок, и они станут повсеместно распространенным средством решения интеллектуальных задач

ЭЙБРАХАМ ПИЛЕД

ВНАЧАЛЕ, когда компьютер был только что изобретен, к нему относились как к интересной лабораторной новинке. Сегодня же нельзя себе представить, чтобы современное индустриальное общество могло существовать без него. Местная и транснациональная финансовая служба, промышленное производство и транспорт — все опираются на потоки информации, обрабатываемые электронными средствами. Без компьютеров теперь не могут обойтись ни технологи, разрабатывающие новые материалы или лекарства на биологической основе, ни физики, исследующие природу энергии и материи. Масштабы проникновения компьютеров во все сферы умственной и физической деятельности человека не имеют аналогов. Компьютеризация, — пожалуй, наиболее впечатляющее научно-техническое достижение в истории. Во всяком случае, это несомненно для тех, кто непосредственно связан с вычислительной техникой.

Похоже, что сейчас компьютеризация вступает в новую фазу. На этом этапе благодаря достижениям в области аппаратного и программного обеспечения, компьютеры в течение следующего десятилетия станут мощнее, «умнее» и универсальнее на порядок. В то же время они получат повсеместное распространение и образуют интеллектуальную службу, в конечном счете столь же доступную, как телефон. Пользование средствами вычислительной техники будет облегче-

но наличием широкой номенклатуры интерфейсов, обеспечивающих визуальный и другие способы естественного общения человека с машиной, а гибкие сети с большой пропускной способностью смогут связать любую группу людей, нуждающихся в автоматизированной обработке информации, будь то врачи, пытающиеся поставить сложный диагноз, банкиры, подготавливающие финансовую операцию, инженеры аэрокосмической техники, создающие новый летательный аппарат, астрофизики, моделирующие эволюцию Вселенной, или студенты, готовящиеся к экзамену.

ХОТЯ появление такой интеллектуальной службы отражает глубокие изменения в отношении общества к вычислительной технике, оно является прямым следствием тех устойчивых тенденций, которые сложились после второй мировой войны и на которых основывался научно-технический прогресс в этот период. Наиболее важным фактором была миниатюризация электронных изделий. В основном именно благодаря миниатюризации в течение трех десятилетий поддерживается постоянное снижение стоимости вычислений на 20—30% в год. По мере уменьшения размеров транзисторов, вентилях и других элементов, получаемых травлением в кристалле, пропорционально возрастает скорость вычислений, а плотность элементов на единицу площади кристалла растет со временем в

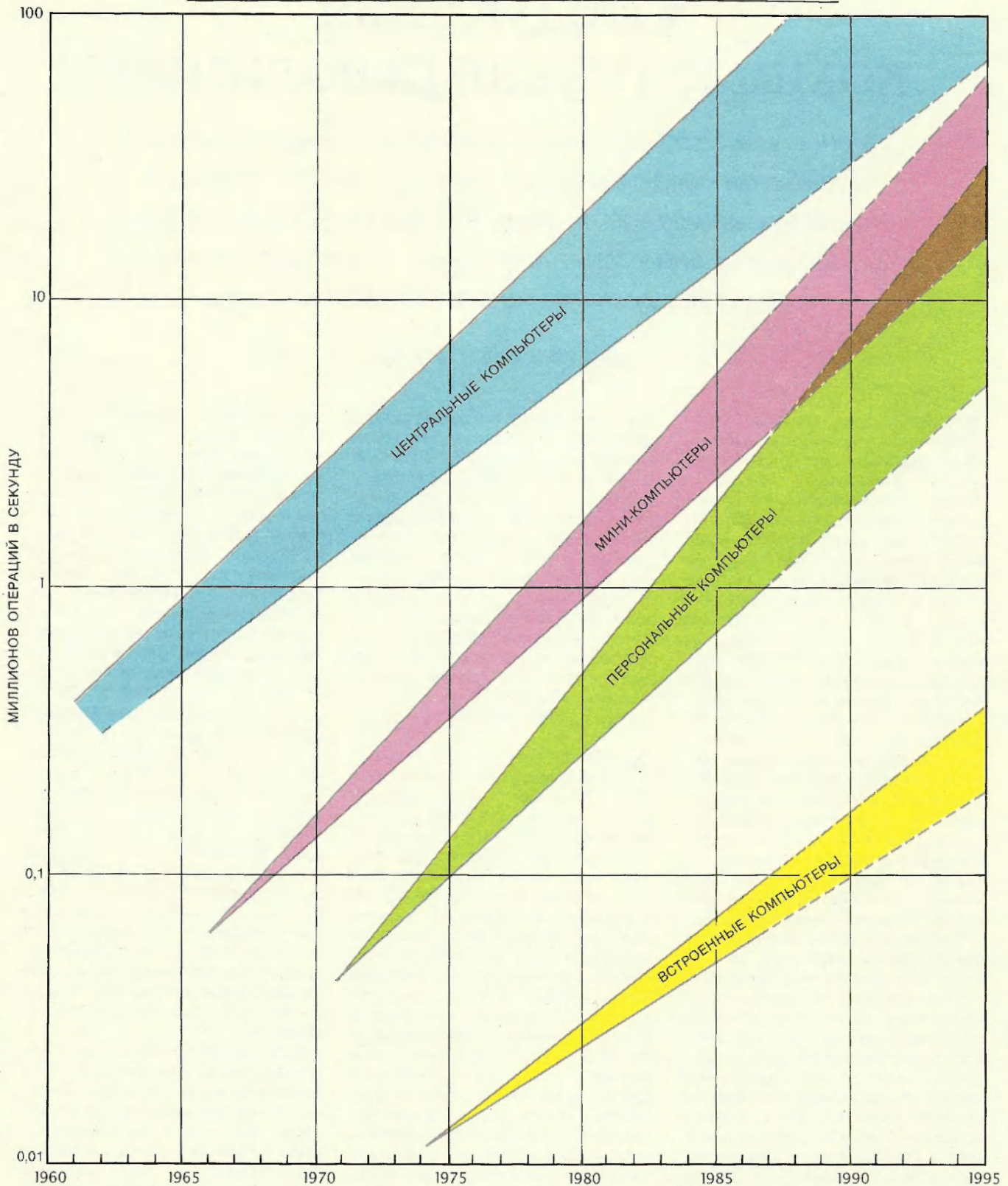
геометрической прогрессии.

Можно ожидать, что миниатюризация будет продолжаться и далее теми же темпами по крайней мере в следующие 10 или 15 лет за счет достижений в области технологии изготовления микросхем (см. статью Джеймса Д. Мейндла «Микросхемы для компьютеров» на с. 26). Рентгеновская литография с использованием синхротронного излучения, новые материалы и улучшенные структуры электронных устройств, вероятно, увеличат плотность компонентов в кристалле в 20—40 раз. Быстродействие таких процессоров, по-видимому, возрастет в 6—12 раз.

Эти усовершенствования будут сопровождаться постоянным ростом масштабов параллельной обработки данных в вычислительных системах. Практически все компьютеры выполняют вычисления последовательно, т. е. одну операцию за другой. Параллельная обработка значительно более производительна, так как она позволяет компьютеру работать во много раз быстрее за счет одновременного выполнения всех или нескольких шагов задачи (см. статью Дж. Фокса и П. Мессины «Архитектура компьютеров» на с. 16).

Если миниатюризация определяет темпы технического прогресса вычислительных систем, то скорость, с которой они проникают в промышленность, сферу услуг и научные исследования и преобразуют их, в конечном счете зависит от того, насколько быстро может развиваться и распространяться программное обеспечение. Причина в том, что программное обеспечение превращает компьютер из инструмента, который может решить данную задачу в принципе в инструмент, который может решить ее практически. Не существует единой или даже какой-нибудь господствующей технологии программного обес-

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИСПЛЕЙ изображает в бесконечной перспективе серию вращающихся кубов (вращение прослеживается на 6 кадрах). Изображение формируется программным обеспечением, разработанным для создаваемого специализированного графического устройства SAGE, которое будет состоять из 16 млн. транзисторов. Система SAGE может «манипулировать» одновременно несколькими тысячами многоугольников. Она представляет собой прототип однокристалльных устройств, на базе которых в течение следующих 10 лет будут создаваться многие графические дисплеи.



ЭВОЛЮЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН общего назначения за 40 лет. Рассматриваются 4 типа машин: центральные (синий цвет), мини-компьютеры (розовый), персональные (зеленый) и встроенные компьютеры (желтый). Для каждого типа показан рост границ диапазона быстродействия (в миллионах операций в секунду). Пунктирные линии соответствуют прогнозу. Во все времена вычислительная мощность центральных компьютеров больше, чем вычислительная мощность мини-машин; последние

мощнее персональных компьютеров, которые в свою очередь превосходят по этому показателю встроенные компьютеры. Кроме того, единица вычислительной мощности обходится дешевле на менее мощных машинах. Так в 1987 г. относительная стоимость выполнения одного миллиона операций в секунду на центральном компьютере примерно составляет 100 единиц, на мини-машине — 40, на персональном компьютере — 3, а на встроенном компьютере (если бы он был достаточно мощным) — 0,15 единицы.

печения. Развитие его будет идти по пути улучшения структуры, повышения мощности языков и увеличения эффективности самих программных средств (см. статью Д. Гелернтера «Современное программирование» на с. 36).

В контексте программного обеспечения термин «структура» относится к эффективности или даже изящности способа, с помощью которого подпрограммы, составляющие полную программу, объединяются вместе, чтобы машина могла выполнить свою задачу. Язык дает возможность пользователю сообщить машине, как реализовать программу или некоторую ее часть, чтобы решить ту или иную задачу. Мощность машинного языка измеряется требуемой степенью детализации. Наиболее мощные языки позволяют пользователю просто задавать математическую или логическую формулировку задачи в расчете на то, что машина сама сможет справиться с ее детализацией.

Программная среда, т. е. ряд физических и логических средств, с помощью которых программист передает машине команды, прошла путь от обычных тумблеров до клавиатуры и манипулятора типа «мышь», от блок-схем и бланков для кодирования программ до интерактивных текстовых и графических представлений. Технический прогресс обещает вооружить нас еще более естественными средствами общения с машиной (см. статью Дж. Фоли «Человеко-машинные интерфейсы» на с. 58). Бесспорно, что большая часть усилий при создании программного обеспечения направлена на устранение рутинных препон на пути использования компьютера, с тем чтобы концептуальная сторона оставалась единственной трудностью при решении интересующей нас задачи.

БЫСТРО падающая (вследствие прогресса в аппаратном и программном обеспечении) цена вычислений делает все более доступным использование различных категорий компьютеров, отличающихся как по стоимости, так и по производительности: большие универсальные компьютеры, мини-компьютеры, персональные компьютеры, компьютеры, встроенные в управляемые ими устройства.

Такие мощные системы появляются благодаря непрерывному повышению степени миниатюризации. В основе этой тенденции лежит непрерывное совершенствование процесса литографии (посредством которого в кристалле вытравливаются по шаблону требуемые элементы) и техноло-

гии производства. Сегодня литография и технология изготовления полупроводниковых схем позволяют достичь разрешающей способности от 1,0 до 1,5 мкм. Оптическая литография, вероятно, позволит создавать элементы величиной всего лишь 0,4 мкм. Рентгеновская литография сможет обеспечить получение элементов размером 0,1 мкм (для сравнения укажем, что человеческий волос имеет толщину 100 мкм).

По мере уменьшения размеров элементов появляется новый ряд проблем, называемых паразитическими эффектами. Когда расстояния измеряются микронами, электрические и магнитные поля, порождаемые элементами микросхемы и тончайшими соединительными проводниками, взаимодействуют друг с другом и делают невозможным выполнение требуемой операции. Тем не менее технология полевых транзисторов (которая все более широко внедряется в производство всех видов компьютеров, за исключением наиболее высокопроизводительных) будет, по видимому, содействовать дальнейшему повышению плотности и скорости. Время между приемом сигнала на входе и изменением сигнала на выходе, называемое вентиляющей задержкой, к 1997 г. будет составлять примерно 200 пс (1 пикосекунда равна одной триллионной доле секунды). Плотность достигнет 16—20 млн. элементов на микросхему. Естественным следствием такого прогресса должны стать кристаллы памяти с емкостью 16 млн., 64 млн. и даже 256 млн. бит.

Микропроцессоры, построенные на этой технологии, могли бы работать со скоростью от 30 до 60 млн. опер./с. На этой технологии можно было бы построить однокристалльный компьютер, включающий память, адаптеры ввода-вывода и способный работать со скоростью 1 или 2 млн. опер./с. По своим возможностям он был бы эквивалентен современному персональному компьютеру. Ясно, что можно реализовать и любой промежуточный вариант.

Биполярная технология (изначальная транзисторная технология), на которой базируются все основные узлы высокопроизводительных машин, также может развиваться в этом направлении. Не трудно предсказать, что в скором времени величина вентиляющей задержки в 40 пс для биполярных транзисторов станет обычной. Так как биполярные элементы потребляют относительно большое количество энергии, то достижение большей плотности препятствует проблеме рассеяния тепла. Решить

эту проблему можно будет лишь с появлением новых материалов, возможно даже высокотемпературных сверхпроводников.

Так как скорость выполнения команд возрастает, компьютеры становятся способными за данный период времени перерабатывать и выдавать все большее количество информации. Это справедливо и когда компьютер моделирует ситуации в экономике и когда он синтезирует изображения колеблющихся молекул белка. Следовательно, емкость запоминающих устройств, из которых машина черпает информацию или в которые она помещает информацию, должна возрастать (см. статью Марка Х. Крайлера «Технология хранения данных» на с. 46). Действительно, за последние 20 лет устройства с магнитной записью, такие как диски, были значительно улучшены и их емкость возросла. В 1967 г. она составляла примерно 31 000 бит/см². В 1987 г. она уже превысила 3 млн. бит/см². При сохранении этой тенденции за 10 лет можно было бы достичь плотности хранения информации свыше 15 млн. байт/см³ (что эквивалентно количеству знаков в 300 романах). Оптические запоминающие устройства, такие как компактные диски, смогут обеспечить плотность записи информации в 5—7 раз больше той, которая достигима на магнитных устройствах.

ПОСТОЯННОЕ увеличение объема информации порождает потребность в расширении масштабов связи (см. статью Роберта Е. Кана «Компьютерные сети» на с. 66). Потребность эта выражается, в частности, в необходимости устанавливать связь между вычислительными машинами и их пользователями, находящимися в разных местах. Учитывая сложившуюся тенденцию и ориентируясь на будущее, многие страны уже сейчас широко ведут исследования в области технологии волоконной оптики. В США, например, уже проложено более 400 000 км волоконно-оптического кабеля. Их пропускная способность в настоящее время используется только на 25%, а то и меньше и главным образом для передачи речи. В продаже имеются устройства для приема и передачи информации по волоконно-оптическому кабелю со скоростью 1,7 млрд. бит/с; экспериментальные варианты работают со скоростью 10 млрд. бит/с.

Повысить быстродействие и снизить цену на вычислительную технику могли бы интегрированные оптоэлектронные схемы на арсениде галлия, полупроводниковом материале, который может эффективно преобразо-

вывать свет в ток и ток в свет. В следующее десятилетие широко доступными станут высокоскоростные сети компьютеров с пропускной способностью 45 млн. бит/с. Результатом доступности таких систем, на три порядка более совершенных, чем их предшественники 70-х годов, будет нечто гораздо большее, чем просто их количественный рост. Реальными станут прикладные системы с быстрой сменой наглядных образов. Появятся новые конфигурации вычислительных систем, в которых дистанционно удаленные компьютеры будут быстро оказывать услуги, как если бы они находились в одном здании. Эксплуатация таких сетей потребует значительного продвижения в области программного обеспечения связи, новых и более эффективных протоколов, а также специализированных вычислительных элементов, которые обеспечивают аппаратную реализацию таких протоколов.

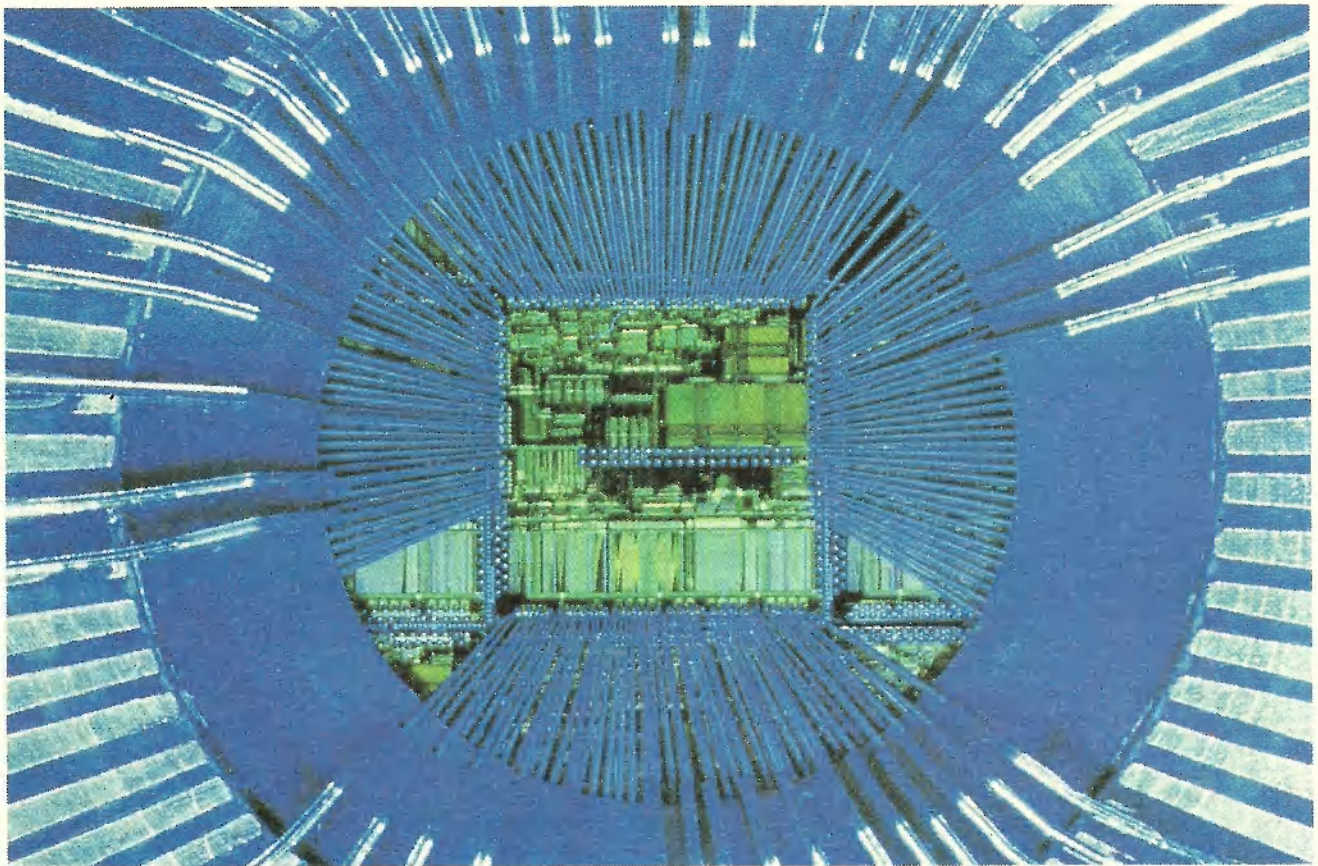
Вследствие усовершенствования полупроводниковой технологии и улучшения разрешающей способности экрана в распоряжение пользователей таких систем и других машин-

ных средств поступят высококачественные быстродействующие дисплеи, стоимость которых будет вполне умеренной. Новые дисплеи смогут демонстрировать быстро меняющиеся, в высшей степени детализированные изображения, иллюстрирующие результаты сложного моделирования. С дисплеем можно будет взаимодействовать, чтобы исследовать влияние некоторого изменения, например, при введении нового элемента в молекулярную структуру или при замене профиля крыла самолета. Высокое разрешение дает и другое преимущество: на экране можно показывать текст, сравнимый по качеству с лучшими образцами печатной продукции. Работы, проведенные в отделении научных исследований фирмы IBM, показали, что если качество изображения на экране улучшить на 20—30%, то скорость чтения и восприятия информации будут сравнимы со скоростью чтения и восприятия печатного материала.

Создание таких устройств потребует разработки специальных графических микросхем. В отделении научных исследований фирмы IBM, например,

разработан прототип системы такого типа. Сокращенно он называется SAGE (Systolic Array Graphics Engine). Система SAGE обрабатывает множество из нескольких тысяч многоугольников, производя изменения формы и демонстрируя их как в мультфильме. Используя параллельные вычисления, она по мере необходимости генерирует новое изображение в реальном масштабе времени. SAGE состоит из более чем 16 миллионов транзисторов. В будущем их можно будет поместить в одном кристалле.

ЖАЛЬ, что прогресс в создании добротного программного обеспечения идет не так быстро, как в конструировании более совершенных компьютеров». В ответ на это высказывание можно сказать, что в умении создавать программное обеспечение все же достигнут существенный прогресс; просто его трудно заметить на фоне беспрецедентных темпов прогресса в аппаратном обеспечении и появлении несоизмеримо более значительных новых возможностей, обусловленных этим прогрессом. Составление программ — дело не легкое,



ОДНОКРИСТАЛЛИННЫЙ КОМПЬЮТЕР размером 10 × 10 мм может работать с быстродействием 350 000 опер./с. Это устройство — одно из 87, вытравленных на плате. Контакты и тестовые схемы позволяют специалистам из отдела-

научных исследований фирмы IBM одновременно проверить все цепи устройства. При обнаружении дефекта в каком-либо устройстве оно может быть забраковано и изъято при разрезании платы на отдельные компьютеры.

так как оно подразумевает изложенные пути решения проблемы с достаточной степенью подробности, чтобы машина смогла реализовать его. Выбор из нескольких возможных решений с учетом таких ограничений, как вид получаемых данных, — в принципе задача сложная. Эта сложность, усугубляемая тем, что программное обеспечение постоянно изменяется в процессе модернизации и адаптации, перерастает в серьезную проблему.

Создание и развитие языков высокого уровня — часть решения задачи по обеспечению условий, чтобы программное обеспечение могло реализовать потенциал, заложенный в аппаратуре. На языке высокого уровня команды выражаются кратко, с относительно небольшим количеством подробностей. Например, вместо того чтобы специальным образом инструктировать машину для просмотра всех персональных записей, можно приказывать ей на языке, называемом SETL, выполнить математическое условие над группой записей: «Вычислить величину налога в процентах к валовому доходу для всех налогов на прибыль, сообщая валовой доход в 1000 000 долл. и выше». Такие языки широко используются при разработке и испытании опытных образцов систем. Испытание опытных образцов помогает обнаруживать многие принципиальные трудности и находить пути их решения. Этот весьма обнадеживающий способ создания программного обеспечения путем постепенного наращивания мог бы существенно повысить производительность труда программистов.

Дополнительный прогресс в развитии программного обеспечения будет обусловлен включением языков, имеющих целью облегчить реализацию больших проектов в области программирования. Слабым местом в таких проектах является то, что из-за временных или экономических соображений многие части системы должны разрабатываться параллельно. Это обстоятельство заставляет фокусировать внимание на тщательной разработке интерфейсов. Поскольку срок жизни этих программ велик, язык должен допускать их модификацию и совершенствование. Особый упор в этой области делается на представление в языке механизма инкапсуляции данных и процедур, позволяющих использовать данные только заранее определенным образом. Этим часто приходится жертвовать в угоду текущим нуждам, диктуемым соображениями эффективности.

Раньше проектные решения в основном были направлены на повыше-

ние эффективности. Поскольку цена вычислений продолжает уменьшаться, решения разработчиков будут нацелены на совершенствование структуры и обеспечение модульности. Наконец, будут разработаны и начнут использоваться методы, уменьшающие время, необходимое для про-

граммирования. Примером является язык PROLOG, который освобождает программиста от составления программы в виде последовательности действий, благодаря чему он сможет сосредоточить свое внимание на простых логических связях между элементами программы.

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Чтобы купить вычислительную систему, способную выполнить задачу за минимальную цену, упомянутый в тексте управляющий информационным банком мог бы использовать следующие уравнения.

$$(1) P_1 = M \times C(M), \text{ где}$$

P_1 — Стоимость выполнения задачи на одном процессоре

M — Быстродействие в миллионах операций в секунду, требуемое для выполнения данной задачи

C — Удельная цена вычислений при максимальном быстродействии (в долларах на млн. опер./с)

$$(2) P_n = (e \times M) \times C \left(e \times \frac{M}{N} \right), \text{ где}$$

P_n — Стоимость выполнения задачи на нескольких менее быстродействующих процессорах

N — Количество менее быстродействующих процессоров

e — Коэффициент расширения, учитывающий увеличение объема работы, вызванное разделением задачи между несколькими процессорами

Несколько процессоров предпочтительнее, если

$$(3) e < \frac{C(M)}{C(e \times M/N)}$$

При $N = 10$ и $e = 2$ несколько процессоров лучше, если

$$(4) \frac{C(M)}{C(M/5)} > 2$$

Более точная оценка стоимости выполнения задачи:

$$(5) P_n = (k \times M + m \times I_m) \times C \left(\frac{k \times M + m \times I_m}{N} \right) + m \times B, \text{ где}$$

k — Коэффициент расширения, учитывающий необходимое увеличение скорости вычислений

m — Количество сообщений, которыми будут обмениваться процессоры

I_m — Объем вычислений, требуемый в среднем для пересылки одного сообщения

B — Средняя стоимость пересылки одного сообщения по линии связи

При $N = 10$, $m = 100$, $k = 2$, $I_m/M = 0,005$ и $m \times B/C(M) = 0,1$ мультипроцессорная система лучше, если

$$(6) \frac{C(M)}{C(M/4)} > 2,8$$

Если B возрастет в 5 раз, то критерий будет иметь вид

$$(7) \frac{C(M)}{C(M/4)} > 5$$

Если I_m уменьшится в 10 раз, то критерием будет неравенство

$$(8) \frac{C(M)}{C(M/4,87)} > 2,27$$

Если $m \times B/C(M) \geq 1$, то разделять задачу между несколькими процессорами невыгодно.

ПО МЕРЕ ТОГО как программист будет осваивать эти новые средства, его работу будет облегчать появление персональных компьютеров с легко доступными хранилищами, содержащими информацию о программах. Эти интерактивные системы обеспечат быстрый доступ к различным взаимосвязанным аспектам программы. Примером реализации такого интерактивного режима работы может служить разработанный в Корнеллском университете синтезатор программ, первый опыт эксплуатации которого показал эффективность ряда встроенных в язык средств для изучения техники программирования. А совсем недавно в Университете Брауна была разработана система Garden, в которой для предоставления пользователю множества данных о программе были мобилизованы графические возможности рабочих станций.

Нельзя не сказать и об экспертных системах, которые являются одно-

временно и инструментом, и продуктом технологии программного обеспечения. Пожалуй, именно в области разработки программ эти системы используются наиболее широко. Типичная экспертная система действует на основе понятий из области прикладной логики, формализованных в наборе правил (если А и В, то сделать С), и включает в себя программу общего назначения, так называемую машину умозаключений, которая ищет правила, подходящие для достижения указанной цели, и затем выполняет их. Такой подход в программировании освобождает программиста от детализации структур данных и управления потоком (т. е. подробного указания порядка, в котором должны выполняться операции). Система разрешает также в любое время и в любом порядке добавлять новые правила. Это делает такие системы особенно удобными для быстрой разработки опытных образцов и при необходимости последовательного их на-

ращивания. Областью, в которой благодаря интенсивной работе данная технология ближе всего подошла к практическому использованию, является медицина (см. статью Гленна Д. Реннелса и Эдварда Г. Шортлифа «Вычислительные системы для медицины» на с. 86).

Хотя кажется, будто программное обеспечение отстает от аппаратного, ретроспективный взгляд на развитие вычислительной техники показывает, что в обеих этих областях прогресс в последние годы был весьма значительным и пока нет оснований говорить о снижении достигнутых темпов (см. рисунок на с. 8). В частности, имел место устойчивый рост вычислительной мощности, и все больший диапазон мощностей был доступен за разумную плату. Технические достижения сделали возможным производство значительно меньших, но «полезных» компьютеров с существенно более низкой стоимостью за миллион операций в секунду, а также с более



RP3 — ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД фирмы IBM предназначен для моделирования различных параллельных архитектур и их сопоставления при решении специфических классов задач. С его помощью можно определить эффектив-

ность той или иной архитектуры для конкретной задачи; расходы на создание опытных образцов специализированных компьютеров при этом исключаются.



GF11 — параллельный процессор для научных вычислений, способный выполнять 11 млрд. операций с плавающей точкой в секунду; в настоящее время создается в отделении научных исследований фирмы IBM. Первым его при-

менением будет вычисление массы протона, которое займет 4 месяца. При решении этой задачи на суперкомпьютере потребовалось бы 15 лет.

низкой общей стоимостью самих систем. Как следствие появились новые стоимостные категории: за универсальным компьютером последовали мини-компьютеры, персональные компьютеры и встроенные компьютеры. Выделение этих классов — естественный результат развития техники и экономики. Появление более плотных схем, потребляющих меньше энергии при наличии систем охлаждения и более дешевый монтаж открывают возможности для новых проектных решений. Возрастающие потребности в вычислениях за низкую цену порождают добавочную экономию, которая является следствием массового производства.

ВАЖНО отметить, что чем меньше система, тем меньше у нее память, тем хуже характеристики дисков и тем меньше возможности у средств ввода-вывода; поэтому такие системы просто не в состоянии выполнять многие большие программы. В то же время, у пользователей, задачи которых могут выполняться на

любых из этих систем, свобода выбора, очевидно, возрастает; новые приложения при прочих равных условиях будут, как правило, появляться в самой нижней возможной для них категории. По мере того как предельная скорость, измеряемая в миллионах операций в секунду, для каждой категории возрастает, общее количество экономически оправданных приложений растет еще быстрее, так как оно является суммой всех приложений, оправданных для каждого уровня.

Накопленный на сегодня опыт показал, что отдельные процессоры (или небольшое число тесно связанных процессоров) наиболее универсальны; кроме того, их мощность, производительность (фактический объем обрабатываемой информации в единицу времени) и время ответа предсказуемы и хорошо подходят для широкого класса приложений. Эффективность, производительность и время ответа любой мультипроцессорной конфигурации сильно зависят от ее назначения.

Например, управляющему инфор-

мационным банком для регистрации информации, поступающей от сети автоматических установок, принимающих заявки клиентов, может потребоваться система, способная выполнять 100 транзакций (логических взаимодействий) в секунду. Чтобы получить время ответа менее одной секунды, он мог бы купить одну машину с производительностью 50 млн. опер./с. Можно предположить, что 10 машин с производительностью 5 млн. опер./с. обошлись бы дешевле, но этот расчет не учитывает ряд факторов. Управляющий должен принять во внимание коэффициент расширения: стоимость аппаратуры и программ, необходимых для координации работы 10 таких компьютеров. После учета коэффициента расширения одна машина большей производительности может оказаться более выгодной (см. пример расчета на с. 11).

Не исключено также, что стоимость связи между отдельными компьютерами будет столь же высокой, как и стоимость одного компьютера, по мощности эквивалентного

суммарной мощности отдельных машин, или превзойдет ее. Дело в том, что по мере расширения номенклатуры доступных вычислительных машин, выбор будет зависеть в основном от способов доступа к данным и разделения данных, а не просто от стоимости самих вычислений.

Эти рассуждения имеют силу при разработке самых разнообразных систем — от тех, которые охватывают операции большой корпорации, до тех, которые предназначены для обслуживания отдельного работника. В большой корпорации более 100 тыс. терминальных узлов могут порождать до 1000 одновременных запросов. И тот и другой показатель возрастают на порядок, если речь идет об обработке транзакций между предприятиями.

ВЫБОР системы в значительной степени будет зависеть от специфики области ее использования. Для оформления коммерческих сделок, например, может потребоваться система, время ответа которой не превышает 1 с. Следовательно, при данном объеме транзакций и стоимости наиболее экономически выгодной может оказаться система, состоящая из 4 процессоров, каждый из которых способен выполнять 18,5 млн. опер./с. Географическое расположение такой системы всегда влечет некоторые издержки. Время ответа возрастает пропорционально количеству сообщений, связанных с каждой транзакцией. Даже если очень широкая полоса пропускания исключает временную задержку в линии связи, ответ все равно будет задержан вычислительной системой, поскольку некоторое время потребуется на обмен сообщениями (операции, необходимые для выполнения в каждом компьютере, чтобы послать и принять сообщение). Создание гигантских, охватывающих весь мир систем будет связано с рядом сложнейших проблем, а именно распространением, поддержанием работоспособности и модификацией программного обеспечения, не считая проблем, возникающих вследствие непрерывного характера работы и наличия межведомственных сетей. Сложности, которые будут возникать по мере возрастания масштабов сетей, потребуют новых алгоритмов, иных структур данных и даже новых концепций.

В противоположность системам, используемым в масштабе одного предприятия, в которых главным является разделение данных, в персональных вычислительных системах основным показателем является их мощность. Эти системы проектиру-

ются таким образом, чтобы отдельный работник или небольшая группа профессиональных работников могли использовать возможности машины при решении стоящих перед ними проблем. Основное их достоинство в способности работать в режиме разделения времени и интерактивном режиме при использовании центрального компьютера; с появлением персональных компьютеров в развитии таких систем произошел скачок. В будущем они обещают произвести коренные изменения в природе автоматизированной обработки информации, сделав ее универсальным средством расширения интеллектуальных возможностей человека.

Что же касается персональных компьютеров, то в следующем десятилетии они, возможно, будут иметь на порядок более высокую вычислительную мощность по сравнению с мощностью типичной машины сегодняшнего дня и в 10—100 раз более емкую память. Высококачественный и быстродействующий экран персонального компьютера будет менее чем за 1 с воспроизводить новый образ, состоящий из 1—4 млн. пикселей и имеющий от 64 до 256 цветовых оттенков.

Значительная доля вычислительной мощности пойдет на то, чтобы сделать машину более удобной в использовании, реализовав естественные для человека средства общения с машиной, например речи или письма. Сотрудники отделения научных исследований фирмы IBM разработали систему, способную распознавать 20 тыс. слов, если при произношении между словами делаются короткие паузы. Эта система содержит 60 млн. команд, выполняемых четырьмя специализированными микропроцессорами и персональным компьютером типа PC/AT фирмы IBM. Четыре года назад такой компьютер занимал бы площадь одной комнаты; через пять лет он, вероятно, станет меньше перфокарты. Распознавание непрерывной речи потребует в 30 раз большую вычислительную мощность; дополнительная память и вычислительная мощность потребуются и для улучшения правильности распознавания и уменьшения чувствительности к шумовому фону.

Терминалы, способные обрабатывать рукописную информацию, позволяют пользователю «писать» на плоском экране (выполненном на жидких кристаллах); компьютер распознает символы и преобразует их в команды, тексты и рисунки. Опытный образец такой системы обладает быстродействием от 2 до 4 млн. опер./с; необходимые в этом случае

более совершенные алгоритмы потратят только малую долю вычислительной мощности будущих персональных компьютеров.

ПОМИМО распознавания речи и письма, вычислительная мощность персонального компьютера все в большей степени будет использоваться на то, чтобы представлять результаты вычислений в таком виде, при котором человек мог бы интуитивно воспринимать виденное на экране. Диаграммы и графики будут дополнены многоцветными трехмерными образами. В таких мощных интерактивных системах персональный компьютер будет выполнять роль интерфейса, обеспечивающего естественную связь человека с любой вычислительной системой, т. е. служить своего рода окном большой сети или суперкомпьютера, в котором человек за считанные секунды сможет увидеть результаты вычислений, производимых в течение нескольких часов.

Доступность персональных вычислительных средств большой мощности и гибкости позволит инженерам моделировать такие сложные явления, как поведение летательных аппаратов при различных условиях полета (см. статью Альберта М. Эрисмана «Вычислительные системы для автоматизации производства» на с. 000). Результаты во многих случаях окажутся более значительными (и обойдутся гораздо дешевле), чем при моделировании и эксперименте в естественных условиях. Возможность моделирования на компьютерах поведения исследуемого объекта и его внешнего вида поможет архитекторам, дизайнерам, театральным декораторам. Такое машинное моделирование ускорит превращение идеи в ее материальное воплощение. Новые методы и средства моделирования обеспечат возможность создания принципиально иных видов продукции и проектных решений. Кроме того, моделирование на компьютерах будущего позволит ученому-исследователю выполнять эксперименты, которые были бы невозможны в природе, например посмотреть, что случится при столкновении галактик (см. статью Пита Хата и Джеральда Сасмена «Вычислительные системы для научных исследований» на с. 76).

А удастся ли справиться с такого рода вычислениями? Все зависит от их объема и требуемого времени ответа. При модификации формы автомобиля инженеру может потребоваться выполнить 60 млн. операций, чтобы получить результат, и еще 4 млн. команд, чтобы изобразить автомобиль на экране под заданным углом

наблюдения. На персональном компьютере, работающем со скоростью 1 млн. опер./с, эта работа может быть выполнена за 64 с. На компьютере с быстродействием 20 млн. опер./с, к которому через высокоскоростной канал связи подсоединен персональный компьютер, вывод картинки занимает 4 с, а время, необходимое для выполнения расчетов, сокращается до 3 с. Конкурирующими показателями здесь выступают затрачиваемое инженером время и стоимость вычислений. По мере уменьшения стоимости вычислений вычислительные устройства все в большей степени будут подчиняться целям увеличения производительности труда человека.

СЛЕДУЕТ учесть еще один немаловажный момент: машинное моделирование технического изделия, такого как корпус автомобиля или самолета, делает ненужным создание экспериментального образца для лабораторных испытаний. По мере того как разработчикам доступными становятся все более мощные вычислительные средства, необходимые для моделирования реальных объектов и ситуаций, они будут использоваться на всех этапах конструкторско-производственного цикла, кроме последнего. Опыт показывает, что моделирование на компьютерах по гибкости и экономичности во много раз превосходит создание прототипа. Результатом во всех случаях неизменно является лучшая конструкция, будь то киль яхты — претендента на «Кубок Америки» — или более быстродействующий компьютер.

Замечательным результатом экспоненциального роста плотности электронных компонентов и серьезного совершенствования программного обеспечения стал параллельный процессор. Конечно, монопроцессорное устройство, каким является обычный компьютер, еще в течение некоторого времени останется главным средством автоматизации вычислительных работ. Монопроцессорные устройства универсальны и надежны в работе. Однако экономические соображения, а также прогресс в информатике открывают немало новых полезных областей применения для параллельных процессоров (а также для распределенных машин).

Поиск явно идет в направлении достижения наивысшей абсолютной производительности. С этой целью исследуется каждая возможная схема взаимосвязи вычислительных элементов, от тысяч относительно небыстродействующих и недорогих устройств до десятков сверхскоростных

монопроцессорных установок, какие только можно построить. Чтобы обеспечить быструю передачу данных и команд от одного процессора к другому (или другим) с целью минимизации времени простоя, важно, чтобы каналы связи имели исключительно широкую полосу пропускания. Небольшое число сверхскоростных процессоров можно соединить оптическими волокнами, управляемыми оптоэлектронными устройствами. Большое число процессоров должно соединяться через коммутационную сеть (например, в виде компактной матрицы полевых транзисторов), которая устанавливает соединение между двумя любыми процессорами подобно тому, как телефонная станция соединяет два телефона. Сеть прямых соединений между всеми процессорами построить было бы невозможно. Как можно догадаться, создание таких коммутационных устройств является предметом особого внимания. Крайне привлекательной является идея о реализации схемы взаимосвязей по образу и подобию той, которую природа заложила в мозг млекопитающих.

Если для анализа производительности монопроцессорных устройств существуют хорошо зарекомендовавшие себя на практике средства, то для многопроцессорных систем с параллельной обработкой данных такие средства пока довольно примитивны. Сотрудники отделения научных исследований фирмы IBM проводят эксперименты с опытными образцами систем, в которых в параллельном режиме работает небольшое число быстродействующих процессоров. Одним из таких устройств является параллельный процессор RP3, гибкая структура которого позволяет использовать его в качестве опытной установки для исследования различных параллельных архитектур. RP3 разрабатывается в сотрудничестве с Университетом шт. Нью-Йорк. Проект частично финансируется Агентством перспективных исследований министерства обороны. Этот компьютер будет оснащен средствами, которые позволят исследователям собирать в реальном времени информацию о том, насколько успешно различные типы параллельных машин способны выполнять различные задачи.

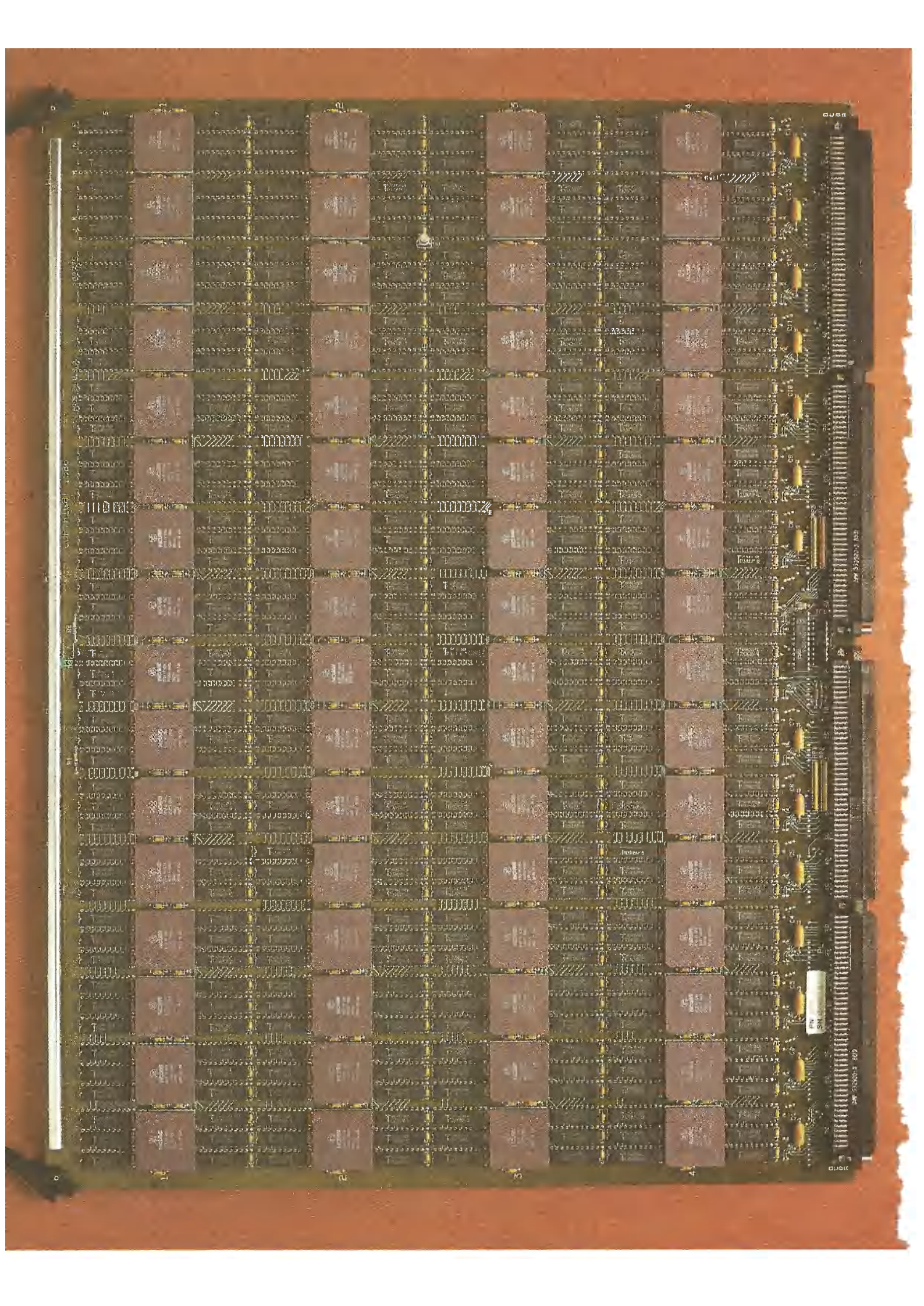
Машиной другого типа, также разработанной в отделении научных исследований фирмы IBM, является параллельный процессор YSE, который моделирует электронные схемы на уровне отдельных компонентов (логических элементов), а не на уровне общей архитектуры системы. Этот

высокопараллельный процессор способен выполнять моделирование в несколько сот раз быстрее, чем любой монопроцессор. YSE позволяет быстро и без затрат на изготовление опытного образца испытывать и отлаживать ряд проектных решений.

По мере появления все более мощных микропроцессоров тенденция создания компьютеров с высокой степенью специализации будет усиливаться. Например, ученые из отделения научных исследований фирмы IBM в настоящее время создают машину Gigaflop 11 (GF11), способную выполнять 11 млрд. операций с плавающей точкой в секунду. Передача данных между 576 процессорами, выполняющими общую операцию, как задумано в проекте, осуществляется через коммутационную систему, называемую сетью перестановок. Первой задачей GF11 будет расчет массы протона на основе квантовой хромодинамики — доминирующей теории, пытающейся описать первичную структуру материи. Это вычисление, для которого необходимо выполнить около 10^{17} операций с плавающей точкой, чтобы обеспечить точность в 10%, на обычном суперкомпьютере заняло бы 15 лет. GF11 должна выполнить эту работу за 4 месяца.

ПРОГРЕСС в области вычислительной техники по крайней мере в следующие 10—15 лет будет продолжаться, быть может, экспоненциально, во всяком случае неослабевающими темпами. Широкая доступность компьютеров для постоянно увеличивающейся численности пользователей будет усиливать их творческий потенциал и содействовать дальнейшему прогрессу.

В настоящее время компьютеризация может расширить возможности человека лишь в простых и рутинных сферах его умственной деятельности. Однако нельзя не отметить настоящего продвижения в направлении расширения средствами компьютеризации аналитических и дедуктивных способностей людей. Точно так же как машины, способные расширить и усилить физические способности человека, породили промышленную революцию, так и компьютеризация, вследствие ее возможности расширить умственные способности людей, является своего рода двигателем новой, уже наступившей революции, но до сих пор еще не получившей адекватного названия. Пока еще сделаны только первые шаги.



Архитектура компьютеров

Обычные компьютеры решают задачу последовательно, шаг за шагом. Высокопроизводительные компьютеры могут работать одновременно над несколькими частями задачи подобно бригаде рабочих, в которой разделение труда позволяет быстрее выполнить работу

ДЖЕФФРИ К. ФОКС, ПОЛ К. МЕССИНА

ПРЕДСТАВЬТЕ себе, что вы руководите постройкой дома и всю работу поручили одному-единственному рабочему. Рабочий, несомненно, применит последовательный подход, т. е. будет совершать работу, предусмотренную проектом (кладка кирпича, прокладка водопровода, электропроводка), поэтапно, выполняя каждое действие очередного этапа в определенном порядке.

Такой способ постройки дома, наоборот, покажется вам слишком медленным. Многие этапы, например кладку кирпича, можно выполнить значительно быстрее, если разделить работу между несколькими каменщиками, работающими одновременно. Другие операции, такие, как прокладка водопровода и устройство электропроводки, не зависят друг от друга и их могли бы одновременно выполнять различные бригады рабочих. И все-таки именно медленный, последовательный способ, когда всю работу, шаг за шагом, выполняет один рабочий, служит аналогом того, как работают большинство современных компьютеров.

В большинстве компьютеров есть только один центральный процессор — устройство, которое производит вычислительные операции, та-

кие, как сложение, умножение или сравнение двух чисел. Программист разбивает каждую вычислительную задачу на последовательность шагов — программу, — и центральный процессор машины выполняет эту последовательность шаг за шагом. Такой подход уже в своей основе является медленным. Во-первых, в каждой фазе вычислений значительная часть процессора простаивает без дела. Например, процедура умножения двух чисел требует нескольких шагов, и одна компонента процессора, предназначенная для выполнения какого-то одного шага, бездействует в то время, пока выполняется другой шаг процедуры. Во-вторых, по аналогии с разделением труда при постройке дома многие вычислительные задачи можно разбить на подзадачи, которые не зависят друг от друга и могут решаться одновременно несколькими отдельными процессорами.

Специалисты, конструирующие архитектуру высокопроизводительных машин, разрабатывают различные подходы, которые позволяют устранить оба фактора, замедляющих вычисления. С одной стороны, они ищут пути повышения быстродействия одиночных процессоров за счет вовлечения в работу большего числа компонент процессора на каждой фазе

вычислений. С другой стороны, они разрабатывают системы, в которых несколько процессоров объединяются в комплексы, называемые параллельными процессорами или параллельными компьютерами. При обоих подходах цель заключается в том, чтобы в каждый момент выполнять сразу много шагов вычислений.

КАКИМ образом можно повысить быстродействие одиночного процессора? Основная причина медленной работы традиционных процессоров кроется в особенностях механизма их доступа к памяти. Если перед выполнением какой-то вычислительной операции необходимо извлечь из памяти данные или машинные команды, все функциональные элементы процессора (логические схемы, реализующие отдельные шаги операций) должны простаивать без дела, пока выполняются циклы обращения к памяти. По завершении операции ее результат часто также должен быть записан в память; таким образом, возникает еще один период времени, в течение которого функциональные элементы процессора бездействуют. Решить эту проблему позволяют такие машины, в которых во время выполнения очередной операции из памяти извлекаются уже следующие команды, которые дешифрируются, т. е. подразделяются на операции, выполняемые различными функциональными элементами процессора.

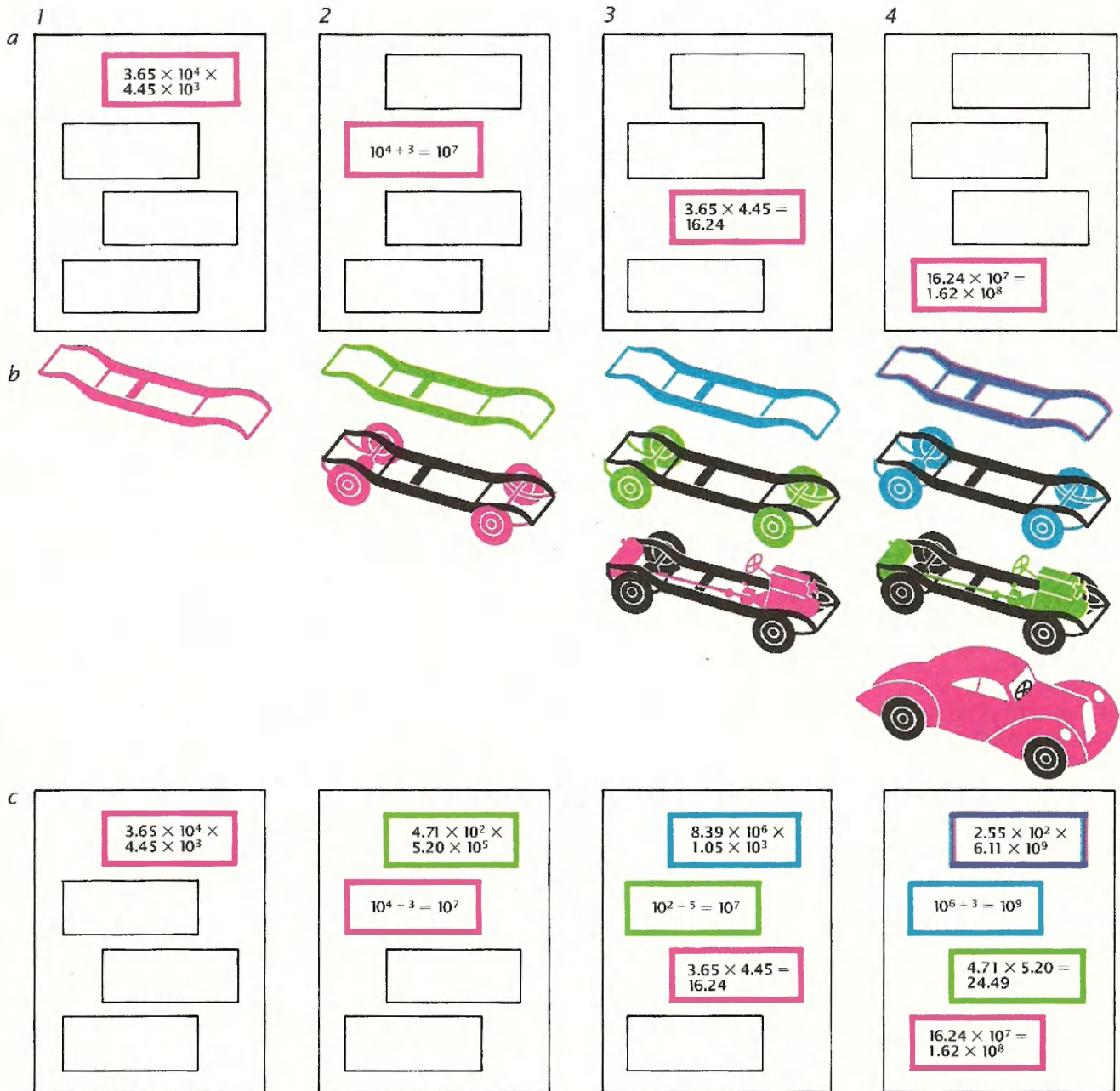
Другим узким местом обычного механизма доступа к памяти являются ситуации, когда перед выполнением операции из памяти нужно извлечь сразу два или более операндов, например когда требуется умножить два хранящихся в памяти числа. Второй операнд невозможно извлечь, пока канал связи с памятью занят передачей первого операнда. А нельзя ли сконструировать память так, чтобы из нее можно было извлекать одновременно несколько элементов данных?

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, когда решение задачи распределяется между несколькими процессорами (устройствами, производящими вычисления), можно описать, используя в качестве примера плату из компьютера NCUBE. Каждый из 64 коричневых квадратиков — это процессор, обладающий примерно такой же мощностью, как мини-ЭВМ VAX 11/750. Черные прямоугольники — это модули памяти; каждому процессору отведено по 6 таких модулей (около половины мегабайта). Компьютер, для которого предназначена эта плата, может иметь от 1 до 16 таких плат (или до 1024 процессоров) в добавок к главной плате, которая содержит процессор, распределяющий работу между остальными процессорами. Среди параллельных систем этот компьютер занимает промежуточное положение. У некоторых параллельных систем меньше процессоров, но они мощнее (ЭВМ Cray X/MP в одной из возможных конфигураций состоит из 4 суперкомпьютеров, связанных параллельно). Другие системы обладают более многочисленными и менее сложными процессорами (коммутационная машина содержит 65536 очень простых процессоров).

Ответ на этот вопрос дает система, известная как память с расслоением. Она особенно эффективна для некоторых видов числовых расчетов, когда последовательно обрабатываются большие массивы чисел. Память с расслоением, как правило, состоит из

небольшого числа запоминающих устройств с независимым доступом. Таких устройств может быть 8 или 16. Первый адрес памяти (ячейка памяти, в которой хранится первое из требующихся в вычислениях чисел) находится в первом запоминающем

устройстве, второй адрес — во втором и т. д. Если независимых запоминающих устройств, скажем, 8, то девятый адрес снова попадает в первое устройство, десятый — во второе и т. д. В такой системе можно одновременно обращаться сразу к нескольким



КОНВЕЙЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА — метод повышения быстродействия одиночного процессора — подобна линии сборки автомобилей. Вычислительные операции часто распадаются на несколько мелких шагов, каждый из которых выполняется одной из специализированных компонент процессора. В обычном процессоре (а), пока одна компонента работает, остальные бездействуют. В рассматриваемом примере требуется умножить два числа. Операция умножения распадается на следующие шаги: извлечение из памяти порядка и мантиссы обоих чисел и выделение этих частей, сложение порядков и умножение мантиссы и

представление полученных результатов в требуемой форме. На автомобильном конвейере (b) ни один рабочий не простаивает: как только данное действие было произведено над одним автомобилем и он продвинулся к следующему рабочему, его место занимает следующий автомобиль. Таким образом, сразу много операций может быть произведено над различными автомобилями. Процессор с конвейерной организацией (c) действует аналогичным образом: по выполнении шага операции над одной парой чисел другая пара поступает для выполнения того же шага, не дожидаясь пока первая пара пройдет все этапы операции.

запоминающим устройствам по отдельным каналам связи, и, таким образом, данные, одновременно требующиеся для обработки, можно извлекать сразу, не ожидая, пока освободится канал связи.

ДРУГАЯ причина неэффективной работы компьютера связана с самой природой вычислительных операций. Каждый, кому приходилось перемножать «в столбик», скажем, семизначные числа, знает, что арифметические операции могут требовать многих мелких шагов. Когда процессор умножает два числа с плавающей точкой (числа, не обязательно являющиеся целыми), он сначала должен разложить каждое число на показатель степени, или порядок, и мантиссу, затем сложить порядки, перемножить мантиссы (эта операция сама по себе требует, вообще говоря, большого количества шагов) и наконец привести произведение к правильному представлению, т. е. найти его порядок и мантиссу. Функциональный элемент, реализующий умножение чисел с плавающей точкой, можно разбить на сегменты, каждый из которых выполняет какое-то одно из описанных действий. Но в этом случае в нашем простом процессоре все сегменты, кроме одного, в любой данный момент будут простаивать, а значит, вычислительная мощность будет расходоваться весьма неэкономно.

Решение этой проблемы можно найти в том способе работы, который применяется на автомобильном конвейере. С конвейера может сходить один автомобиль в минуту. Такая производительность достигается не тем, что тысячи рабочих одновременно работают над одной и той же машиной, а тем, что процесс сборки автомобиля разделен на множество мелких операций, каждая из которых выполняется на определенном рабочем месте конвейера. Когда частично собранный автомобиль проходит по конвейеру мимо данного места, рабочий, находящийся в этом месте, выполняет свою операцию, скажем привинчивает капот багажника или устанавливает радиоприемник. Многократное повторение таких мелких операций на каждом рабочем месте и объясняет такую высокую производительность конвейерного способа сборки.

Для арифметических операций над числами с плавающей точкой тоже можно построить своеобразные конвейеры. Они особенно эффективны для тех приложений, которые требуют многократного повторения одной и той же арифметической операции.

Допустим, к примеру, что некая компьютерная программа содержит много попарных умножений. Для простоты будем предполагать, что каждая из мелких подопераций, на которые разбивается умножение двух чисел с плавающей точкой, выполняется за один машинный такт внутренних часов компьютера. На каждом такте в первый обрабатывающий сегмент процессора поступает очередная пара чисел. Если вся операция умножения требует, скажем, десяти процессорных сегментов, то в конце десятого такта произведение первой пары чисел будет уже готово, произведение второй пары будет почти готово, третья пара будет находиться на расстоянии двух шагов от выхода и т. д., в это время 11-я пара чисел поступит на вход конвейера, а 12-я и последующие пары будут ожидать своей очереди.

То, в какой степени конвейер может ускорить работу компьютера, зависит от структуры конвейера. Конструкция конвейера может быть предназначена и для таких операций, как пересылка данных и извлечение их из памяти, и для арифметических операций. Если, например, какая-то вычислительная операция требует сразу двух или более операндов, находящихся в памяти, и если извлечение операнда из памяти занимает несколько машинных тактов, то благодаря конвейерной организации процессор может начинать циклы обращения к элементам данных на каждом такте, и не дожидаться, пока придет из памяти первый элемент, прежде чем обратиться к следующему.

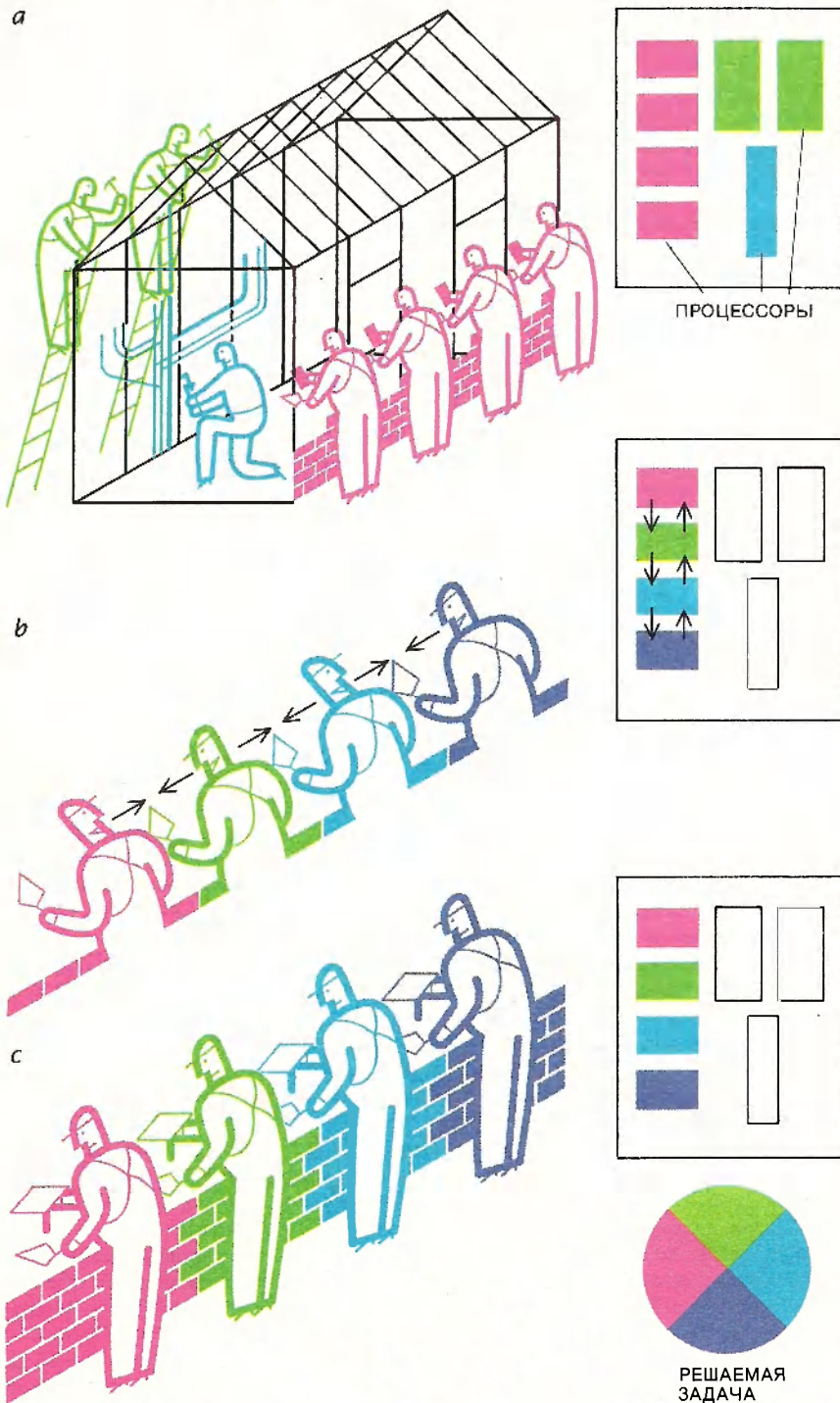
Когда автомобильный конвейер только начинает работать, должно пройти некоторое время, прежде чем с него сойдет первая готовая машина. Она могла находиться в работе несколько дней, хотя производительность конвейера в установившемся режиме равна одному автомобилю в минуту. Период времени от начала выполнения на конвейере первой его операции до момента завершения последней называется латентным периодом конвейера, или просто временем его задержки. Время задержки конвейера зависит от количества его сегментов (т. е. операций) и времени, необходимого для выполнения работы на каждом сегменте. Конвейер с большим временем задержки эффективен лишь в том случае, если количество идентичных операций в задаче достаточно велико. (Точно так же автомобильный конвейер эффективен лишь при массовом производстве. Если бы конвейер запускался каждый раз лишь для того, чтобы сделать десятую другую автомобиль, то его произво-

дительность была бы значительно ниже одного автомобиля в минуту.)

ОСОБЕННО выгодной конвейерная архитектура оказывается для так называемых векторных вычислений. В терминологии вычислительной математики вектор — это по существу упорядоченный массив независимых чисел. Такие массивы и называются векторами, поскольку в геометрии они могли бы представлять наборы значений координат: например, массив из трех чисел может представлять точку или направление в трехмерном пространстве, а массив из четырех чисел — точку или направление в четырехмерном пространстве. В вычислительном контексте векторы могут насчитывать тысячи элементов, не имея никакой геометрической интерпретации.

Часто бывает так, что одна и та же операция должна быть выполнена над каждым элементом вектора. Например, при скалярном умножении векторов первый элемент одного вектора умножается на первый элемент другого вектора, второй элемент умножается на второй и т. д. Такие операции самым естественным образом подходят для конвейерных вычислений, а аппаратура, предназначенная для конвейерного выполнения векторных операций, представляет собой одну из основ архитектуры высокопроизводительных компьютеров. Во многих таких компьютерах часть векторных элементов обрабатывается одновременно при помощи отдельных функциональных элементов центрального процессора. По существу эти машины уже не являются однопроцессорными — они представляют собой некий промежуточный шаг в направлении от последовательных машин к параллельным.

Другой класс машин, являющихся по существу параллельными, образуют машины с «очень длинным командным словом» («Very Long Instruction Word»), или машины типа VLIW. В процессоре такой машины каждый функциональный блок присутствует в нескольких экземплярах. Во время каждого машинного цикла в той его фазе, когда обычный процессор извлекает из памяти одну команду, машина типа VLIW извлекает одновременно несколько команд. Для этого команды группируются вместе в одном «слове», которое процессор читает из памяти. Затем выбранные таким образом команды выполняются одновременно, сразу несколькими функциональными блоками процессора, и можно сказать, что такой процессор ведет себя как параллельная машина.



ПОСТРОЙКА ДОМА служит хорошей аналогией некоторых особенностей параллельной обработки данных. Каждый рабочий соответствует одиночному процессору, весь коллектив строителей — параллельному компьютеру в целом. В постройке дома участвуют рабочие разных профессий — каменщики, слесари, плотники (а, слева); точно так же параллельный компьютер может состоять из процессоров нескольких видов, каждый из которых специализирован для решения определенного вида задач (а, справа). Подобно каменщикам, которые должны общаться друг с другом, чтобы возвести ровную стену (b, слева), процессоры параллельного компьютера должны иметь возможность обмениваться между собой данными (b, справа), если они совместно работают над решением одной большой задачи. Аналогия распространяется и на то, как делится работа. При постройке дома каждому каменщику отводится определенный участок стены (с, слева) и каждый рабочий производит одинаковые действия, но на разных местах. Подобно этому (с, справа) задачу можно иногда разложить так, чтобы все процессоры выполняли одну и ту же операцию, но на различных наборах данных (возможно, представляющих физические условия в определенной области пространства). Такое разложение называется декомпозицией данных.

В машинах типа VLIW порядок выполнения команд должен контролироваться самым тщательным образом, чтобы избежать конфликтных ситуаций, таких, например, которые возникают, когда одна операция требует в качестве операнда результата другой. На рынке уже начали появляться машины, которые могут одновременно выполнять 10 и более команд; проектируются машины, способные одновременно выполнять сотни операций. VLIW-архитектура особенно выгодна для решения задач с неоднородными, разнообразными операциями. Для таких задач плохо подходят машины с конвейерными и векторными архитектурами, требующие определенной регулярности операций.

ВСЕ ОПИСАННЫЕ выше подходы — память с расслоением, конвейеры, векторная обработка и VLIW-архитектура — по существу имеют своей целью повысить быстродействие и эффективность одиночных процессоров. Однако существуют некоторые приложения, где даже быстродействующие одиночные процессоры не обеспечивают необходимую производительность.

Например, реалистическая модель для расчетов в области квантовой хромодинамики (относящейся к теории элементарных частиц), требует повторных вычислений над 100 млн. величин, представляющих характеристики различных физических полей в четырехмерной области пространства-времени, прилегающей к протону. Скорость, с которой проводятся вычисления, отчасти зависит от скорости прохождения сигналов от одной компоненты компьютера к другой. Скорость света в вакууме, максимальная скорость, с которой могут распространяться сигналы, составляет около 30 см за 1 нс ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$). Поэтому, даже если отдельные компоненты процессора будут работать бесконечно быстро, однопроцессорная машина небольших размеров не сможет достичь быстродействия, превышающего несколько миллиардов операций в секунду, что явно недостаточно для решения задач квантовой хромодинамики. В этом случае выход только один — связать много процессоров и получить настоящую параллельную машину.

Конструируя параллельную машину, мы имеем широкий выбор возможных вариантов. Например, сколько всего должно быть процессоров? Каким образом они должны быть связаны друг с другом? Насколько сложными должны быть индивидуальные процессоры? Чтобы

лучше понять суть некоторых альтернатив, стоящих перед специалистом, конструирующим параллельные процессоры, полезно рассмотреть следующую аналогию.

Предположим опять, что вы руководите постройкой дома, однако на этот раз решили заключить контракт со строительной фирмой, обеспечивающей вас рабочими. В этом примере каждый рабочий играет роль индивидуального процессора, а коллектив строителей представляет машину как целое. Каковы характеристики этого «компьютера» и чем он отличается от других возможных подходов к организации работы большого числа «процессоров»?

Система, очевидно, относится к параллельным, поскольку много рабочих выполняют различные операции в одно и то же время. Она также гетерогенна: рабочие различных специальностей (каменщики, электрики и т. д.) решают различные задачи. Однако можно, наверное, представить себе и другие ситуации, когда лучше было бы воспользоваться услугами по сути идентичных рабочих. (Многие высокопроизводительные параллельные компьютеры состоят именно из идентичных процессоров.)

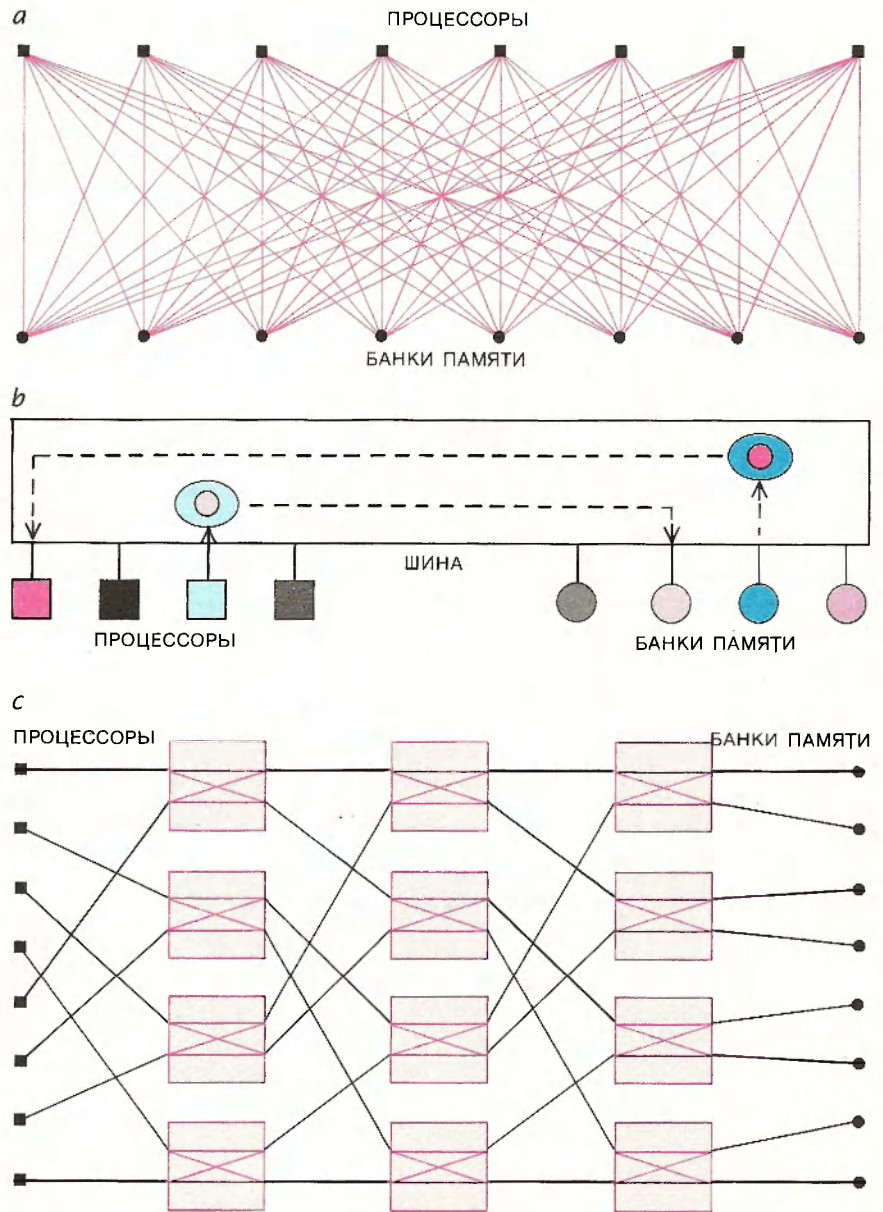
Другое отличительное свойство рассматриваемой системы состоит в том, что индивидуальные «процессоры» достаточно сложны: каждый из них обладает несколькими «функциональными элементами» (руки, ноги и т. п.), которые могут работать одновременно. Такую систему называют «крупнозернистой», поскольку каждый рабочий выполняет в ней довольно значительную и разнообразную работу. Для эффективного функционирования крупнозернистая система не нуждается в развитой сети коммуникаций между ее «процессорами».

Это, впрочем, не означает, что общение между рабочими не играет важной роли. Каменщики, работающие рядом, должны быть в постоянном контакте друг с другом, чтобы сложить ровную стену с гладкими стыками между секциями стены, сложенными разными рабочими. В данном случае система коммуникаций имеет топологию, основанную на связях с ближайшими соседями: другими словами, обмен информацией происходит между рабочими, работающими по соседству.

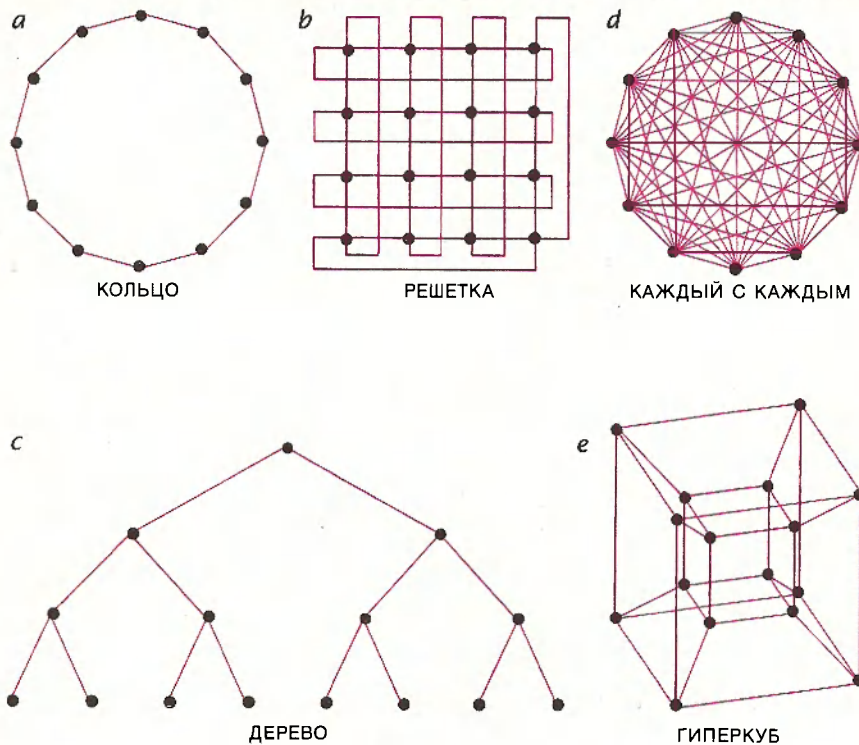
Такая особенность может привести к большим дополнительным затратам (т. е. рабочие вынуждены будут тратить больше времени на разговоры, чем непосредственно на работу), если рабочим нужно передавать много сообщений тем, кто работает на

большом расстоянии от них. По этой причине архитектура многих высокопроизводительных машин имеет топологию коммуникаций, иную, нежели в системе, основанной на связях с ближайшим соседом.

ЕЩЕ ОДНО важное соображение касается инструкций, которым следуют рабочие. Если рассмотреть кладку кирпича, то задача каждого каменщика несколько отличается от задач, поставленных перед другими ка-



РАЗДЕЛЕНИЕ ПАМЯТИ позволяет всем процессорам параллельной системы иметь доступ к глобальным, или общим, модулям памяти. В простой схеме разделения памяти (a) каждый процессор непосредственно соединяется с каждым банком памяти. Недостаток здесь в том, что процессоры и банки памяти должны иметь очень большое количество соединительных линий. Другое решение (b) дает «шина» — общий канал связи, по которому каждый процессор посылает запросы к банкам памяти, а последние выдают данные. Такая шина может быть перегружена (и, следовательно, работать медленно), когда требуется передавать много сообщений. Еще одно решение представляет собой так называемая «сеть омега» (c); в ней процессоры связываются с модулями памяти коммутирующими устройствами, у каждого из которых два входных и два выходных канала. В такой сети каждый процессор может напрямую связываться с каждым модулем памяти, однако здесь нет нужды в таком большом количестве линий связи, которого требует настоящая система с прямыми связями. Преимущества сети становятся все более очевидными по мере роста числа процессоров и модулей памяти. Недостаток ее в том, что иногда сообщения проходят через много коммутирующих станций, прежде чем достигают абонента.



В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТИ устанавливаются соединения между процессорами, каждый из которых монополично владеет некоторым количеством памяти. Простейшие схемы соединения процессоров — это «кольцо» (а) и «решетка» (b). Более специализированная структура связей — «двоичное дерево» (c). Особенно эффективна она в так называемых экспертных системах, в которых последовательности принятия решений могут быть представлены в виде «дерева». Можно также соединить каждый процессор с каждым (d), но для этого потребуется нереалистично большое количество соединений. Одна из новых схем соединения, которая все шире распространяется, основана на топологии гиперкуба (e), в этой схеме процессоры играют роль вершин многомерного куба и соединены его ребрами. (В показанном примере они находятся в вершинах четырехмерного куба.) В этой системе каждый процессор может посылать сообщения любому другому процессору по сравнительно короткому пути, при этом процессоры не перегружаются слишком большим количеством соединений.

менщиками (у стен дома в разных местах могут быть различные особенности, дверные и оконные проемы, орнамент и т. д.), поэтому каждый рабочий следует своему набору инструкций. В ситуации, когда перед всеми рабочими стоят идентичные задачи, скажем на текстильной фабрике, где каждый обслуживает свой станок, а все станки производят ткань с одинаковым рисунком, все рабочие могут исполнять одновременно одни и те же инструкции. Обе эти ситуации имеют аналоги в архитектурных решениях высокопроизводительных компьютеров.

Наконец, последний аспект аналогии с постройкой дома заключается в том, каким образом задачи распределены между рабочими. В том, что касается кладки кирпича, вся задача поделена на много меньших задач, аналогичных друг другу: каждый каменщик «решает» свою маленькую часть общей задачи. Такое распределение работы можно назвать «деком-

позицией данных», обрабатываемых в ходе решения задачи. Оно дает наибольший эффект для тех задач, главная трудность которых заключается просто в размере базы данных. В нашем примере на укладку одного кирпича уходит немного времени, однако общая задача кладки стен оказывается весьма трудоемкой из-за большого количества кирпичей, которые нужно уложить. При разделении этой задачи между многими каменщиками каждый из них должен уложить сравнительно немного кирпичей.

Такие вычислительные задачи встречаются очень часто — модель квантовой хромодинамики как раз и дает хороший пример, — и декомпозиция данных является наиболее естественным подходом к их решению. Однако при этом нужно позаботиться о том, чтобы система связей между процессорами была схожа с естественной топологией решаемой задачи. В данном случае принцип связи с ближайшим соседом достаточно

хорошо соответствует топологии строящегося дома.

Некоторые задачи не поддаются решению посредством декомпозиции данных, и наилучшим подходом к их решению является метод «функциональной декомпозиции», или метод разложения по функциям. И опять хорошей аналогией может послужить строительная фирма. Ее персонал, помимо рабочих, состоит также из менеджеров и бухгалтеров, а среди рабочих, помимо каменщиков, есть еще слесари-водопроводчики и электрики. Общая задача постройки дома разбивается на подзадачи, каждая из которых требует своих собственных специалистов. Параллельный компьютер, построенный по принципу функциональной декомпозиции, в некоторых случаях может работать намного быстрее последовательного компьютера, хотя то, насколько быстрее он работает, зависит от количества разнородных подзадач в задаче. Часто функциональную декомпозицию задачи можно сочетать с декомпозицией ее данных: например, задача постройки дома может быть разделена между бригадами каменщиков, водопроводчиков и т. д., а подзадача укладки кирпича может быть возложена на нескольких каменщиков.

АНАЛОГИЯ с постройкой дома позволяет проиллюстрировать все общие вопросы, возникающие при конструировании параллельного компьютера. Рассмотрим теперь более детально некоторые из этих вопросов и то, каким образом разработчики решили их на практике.

Располагая возможностью включить в конструкцию системы много процессоров, разработчик не обязательно должен ограничиваться идентичными процессорами, создавая тем самым гомогенную (однородную) систему. Почему бы не воспользоваться специализированными процессорами и не построить гетерогенную систему? В конце концов структура многих организаций в обществе основана именно на этом принципе. Например, авиакомпания, обслуживающая наряду с крупными городами также и мелкие населенные пункты, наверняка приобретет небольшие самолеты с поршневыми двигателями, некоторое количество обычных реактивных лайнеров и несколько крупных Airbus.

Уже построено несколько моделей гетерогенных параллельных компьютеров, многие другие модели существуют в проекте. Имеющиеся модели, как правило, содержат лишь два вида процессоров: универсальные и специализированные, предназначенные для

выполнения арифметических операций над числами с плавающей точкой. Были сконструированы и другие системы со специализированными процессорами, в архитектуре которых учитываются особенности таких областей, как искусственный интеллект, машинная графика, базы данных и численные расчеты, однако ни одна крупная система такого типа еще не освоена промышленностью. Поскольку однородные параллельные компьютеры гораздо более распространены среди работающих моделей, мы ограничимся главным образом обсуждением однородных систем.

После того как количество и тип процессоров выбраны, возникает вопрос, каким образом задавать каждому процессору действия, которые он должен выполнять в процессе вычислений? На стройке каждый рабочий следует своему собственному набору инструкций. В терминах вычислительной техники такую систему можно было бы охарактеризовать как систему с множественными потоками команд и множественными потоками данных, или МКМД. Пользуясь системой МКМД, программу можно разбить на отдельные части-подзадачи, распределить эти подзадачи и связанные с ними наборы данных по процессорам, после чего процессоры начинают работать почти независимо друг от друга. Существует и другой подход — создать систему с одним потоком команд и множественными потоками данных, или ОКМД. В такой системе единый поток команд общается одновременно всем процессорам. На каждой фазе вычислений каждый процессор либо выполняет ту же команду, что и все остальные процессоры, либо бездействует.

Хорошую аналогию системе ОКМД дает игра в лото. В этой игре один из партнеров последовательно называет вслух некие числа. Каждое число на самом деле представляет собой команду: «Посмотрите, есть ли на вашей карточке только что названное мною число. Если есть, закройте его, если нет — не делайте ничего». По этой инструкции каждый игрок либо ничего не делает, либо совершает то же действие, что и другие. Числа, указанные на карточках игрока, — это данные, с которыми он работает. В некотором смысле каждую карточку можно рассматривать как локальное запоминающее устройство, доступное только одному процессору. Если игрок, называющий числа, говорит достаточно громко, любое число людей может принять участие в игре, действуя почти в унисон. Все действия совершаются в «запоминающих уст-

ройствах» или рядом с ними, каждое «запоминающее устройство» непосредственно связано со своим отдельным «процессором», выполняющим инструкции (т. е. с игроком).

Одним из естественных приложений для машин типа ОКМД является задача квантовой хромодинамики, упомянутая нами выше. При решении этой задачи каждому процессору отводится задача расчета различных физических полей в своей маленькой области пространства. В таком случае каждый процессор выполняет по существу одну и ту же операцию в применении к своему собственному набору данных. Среди других приложений систем ОКМД можно назвать обработку изображений, анализ течения жидкости и поиск в больших базах данных.

Создано уже несколько моделей, обладающих структурой ОКМД, которые показали себя эффективным средством решения многих расчетных и информационных задач. В качестве примеров можно назвать «Массовый параллельный процессор» (Goodyear Massively Parallel Processor), содержащий 16384 отдельных процессора, и «Коммутационную машину» (Connection Machine), состоящую из 65536 процессоров. Каждый процессор в этих машинах чрезвычайно прост, тем не менее эти машины способны выполнять обычные вычисления, помимо тех задач, которые естественным образом подходят для машин со структурой ОКМД.

КАКИМ ОБРАЗОМ многочисленные процессоры параллельного компьютера должны быть связаны друг с другом и с запоминающими устройствами? Система связей, с помощью которой процессоры могут обмениваться информацией между собой и с запоминающими устройствами, является одной из важнейших характеристик любой параллельной системы, и именно этой характеристикой отличаются между собой большинство параллельных систем. Один из подходов состоит в разделении памяти, когда все процессоры связаны с общей системой памяти или непосредственно, или при помощи сети соединений, или при помощи устройства, называемого шиной памяти. Шина памяти представляет собой информационный канал; по нему процессоры запрашивают нужную информацию, а устройство памяти выдает эту информацию процессорам.

В системе с разделением памяти каждый процессор имеет непосредственный доступ к любой ячейке памяти. Если процессору требуется какой-либо элемент данных, он просто счита-

тывает его из памяти. Но поскольку другие процессоры могут все время изменять данные, хранящиеся в памяти, нужно позаботиться о том, чтобы ни один процессор не обратился к ячейке памяти прежде, чем туда будет записано нужное значение. Большую часть необходимой координационной работы берет на себя программное обеспечение, однако весьма полезной может оказаться и некоторая помощь со стороны аппаратных средств. Существуют, например, системы, в которых некоторые области памяти отведены аппаратуре, следящей за тем, были или не были записаны новые данные в ячейки этих областей; это нужно для того, чтобы предотвратить преждевременные попытки получить доступ к данным, которые должны содержать ячейки.

Одно из ограничений, присущих системам с разделением памяти, связано с тем, что создавать память, которая может обслуживать одновременно большое количество процессоров, технически трудно и вместе с тем дорого. Если каждый процессор непосредственно связан с памятью и таких процессоров, скажем, 1000, а память поделена на 1000 отдельных банков, чтобы не создавать к ней длинных очередей, нужно иметь порядка миллиона каналов связи. Если же все процессоры связаны с памятью через общую шину, то эта шина должна срабатывать настолько быстро, чтобы успевать обслуживать запросы, поступающие сразу от всех процессоров. В этом смысле конструирование общей памяти подобно управлению транспортным потоком на шоссе: в ограниченной пропускной способностью. При заданном пределе скорости и числе полос каждое шоссе обладает определенной пропускной способностью, выражаемой в количестве автомобилей в минуту. Когда на дороге оказывается больше автомобилей, чем она в состоянии пропустить, движение замедляется и возникают пробки. Один из путей решения этой проблемы — строить дороги с большим числом полос (или несколько параллельных дорог), но здесь возникают очевидные практические трудности.

Другой подход к построению коммуникаций в параллельной машине напоминает принцип глобальной телефонной сети. В мире насчитывается несколько сот миллионов телефонных аппаратов, и тем не менее, за редким исключением, каждый аппарат можно соединить с любым другим аппаратом, где бы тот ни находился. Этот эффект достигается, конечно, не путем физического соединения проводами каждого аппарата со всеми дру-

гими. Вместо этого аппараты разбиваются на группы, каждая из которых соединяется со своей телефонной станцией, или коммутатором. Коммутаторы соединены между собой по иерархическому принципу, так чтобы любая телефонная станция обслуживала в достаточной мере ограниченное количество линий связи. Когда делается запрос на телефонную связь (набирается номер телефона), он проходит через несколько автоматических коммутаторов, пока не достигнет требуемого абонента.

Недостатком коммутационной сети является задержка при обращении к памяти, вызванная тем, что информация должна пройти через несколько узлов сети, прежде чем дойдет до нужного запоминающего элемента. Более того, как и в телефонной сети, в ней могут возникать «часы пик», когда сеть перегружена запросами на связь, а это приводит к очень длительным задержкам. Созданы разнообразные системы, позволяющие минимизировать фактор перегрузки сети, но сохраняющие в то же время приемлемую стоимость системы и достаточно быстрый доступ к памяти.

ВОЗНИКАЕТ ВОПРОС: если машины с разделением памяти так сложны и дороги в производстве, то почему бы не отвести каждому процессору некоторое количество ячеек памяти, соединив между собой полученные таким образом пары процессор — память (или, как их называют, узлы)? Системы, построенные по такому принципу, имеют так называемую локальную (или распределенную) память. В архитектурах с локальной памятью данные перед началом вычислений распределяются по соответствующим узлам системы. Однако, вообще говоря, в процессе вычислений одним узлом могут потребоваться данные, хранящиеся в памяти других узлов. Получить доступ к этим данным можно, посылв сообщение соответствующему узлу, с тем чтобы в ответном сообщении была выслана нужная информация. Два узла, обменивающиеся данными, не обязательно имеют непосредственную связь: сообщения могут пересылать другие узлы, находящиеся между ними.

Предложено много различных схем соединения узлов в системах с распределенной памятью. Разработчик, проектирующий подобную систему, преследует сразу несколько целей: коммутация между узлами должна быть быстрой, ни один индивидуальный узел не должен быть перегружен слишком большим количеством соединений, и топология связей должна

естественным образом подходить решаемой задаче. Задача квантовой хромодинамики дает хороший пример того, как должно удовлетворяться последнее условие. Если каждый узел рассчитывает различные физические поля в своей маленькой области пространства, то он должен соединяться с теми узлами, которые выполняют расчеты для соседних областей.

Одна из простейших схем соединения узлов — это кольцо, в котором каждый узел соединяется с двумя другими, а линия соединений замыкается. Другая сравнительно простая схема соединений — решетка, где каждый узел соединяется с четырьмя ближайшими соседями. Хотя в структуру кольца или решетки можно включить сколько угодно узлов, число соединительных линий у каждого процессора мало (две или четыре соответственно). Каждый процессор имеет быстрый доступ к своей собственной памяти, а каналы коммуникации должны передавать сообщения лишь между небольшим числом узлов.

Этим простым топологиям присущи некоторые недостатки. Число промежуточных узлов на пути сообщения, передаваемого от одного узла к другому, может оказаться очень большим (в кольцевой структуре — до половины общего количества узлов), что приводит к значительным задержкам. Если узел, ожидающий прибытия необходимых данных, не найдет себе тем временем какому-нибудь делу, то он будет простаивать. Если данные от других узлов требуются часто, то значительная часть вычислительной мощности будет расходоваться впустую.

Чтобы выйти из этого затруднения, можно воспользоваться несколько более замысловатой топологией, известной как схема n -куба, или гиперкуба. В этой схеме узлы соединены таким образом, как если бы они находились в вершинах многомерного куба. Например, 8 узлов можно соединить в схему трехмерного куба, или 3-куба, в то время как 16 узлов уже образуют топологическую схему, моделирующую четырехмерный куб. (Одномерный и двумерный куб — это соответственно отрезок прямой линии и квадрат.) Вообще же в схему p -мерного куба можно включить 2^p узлов. Максимальный путь, по которому может пройти сообщение, равен $\log_2 p$ (если измерять его длину числом пройденных узлов). В настоящее время промышленность выпускает системы, связывающие 2^{12} узлов по схеме гиперкуба.

Учитывая различия между имеющимися топологиями для систем с разделением памяти и систем с ло-

кальной памятью, а также достоинства и недостатки, присущие обоим подходам, было бы естественно попытаться сочетать эти системы. Можно, к примеру, представить себе гибридную систему, каждый узел которой состоит из относительно небольшого числа процессоров, имеющих общую память. Узлы такой системы, которые уже правильнее называть кластерами, можно было бы соединить в решетку или в схему гиперкуба. Противоположная система, в которой узлы, имеющие каждый свою локальную память, обладают также и общей памятью, уже нашла отражение в нескольких машинах.

УЖ ЕСЛИ МЫ экспериментируем с количеством процессоров и со способами их соединения в компьютере, то почему бы не поэкспериментировать также с тем, каким образом осуществляется управление действиями машины? Почти все существующие компьютеры, включая и параллельные, управляются программами. Программист пишет некую совокупность инструкций, которые затем переводятся (транслируются) на машинный язык, т. е. в коды вычислительных операций, на самом деле выполняющихся компьютером. Программа абсолютно точно определяет выполняемые компьютером действия и их последовательность.

Параллельные системы предоставляют возможность придумывать принципиально иные подходы к управлению действиями компьютера. Большинство этих новых подходов находятся сейчас на экспериментальном этапе. Один из них известен как управление потоком данных. В машинах, управляемых потоком данных, или ориентированных на поток данных, задача представляется в виде ориентированного графа: как множество точек (узлов), которые соединяются между собой дугами. Узлы представляют арифметические или логические операции, а дуги — потоки данных от одной операции к следующей. В реальной физической машине узлы могли бы представляться парами память—процессор, а дуги — линиями связей между процессорами.

Узел в машине, управляемой потоком данных, не выполняет своих операций в последовательности, определенной и явно указанной в программе. Вместо этого он ожидает получения всех данных, требуемых для выполнения операции, а затем выполняет ее и передает результат следующему узлу. Грубой аналогией этого процесса может служить эстафетный бег, в котором каждый следующий бегун стартует в тот момент, когда

принимает эстафетную палочку из рук бегуна, бежавшего на предыдущем этапе. Однако в случае машины, управляемой данными, процессор может ожидать результаты не от какого-то одного процессора, а от многих.

Машину, управляемую потоком данных, можно представлять себе в виде системы, состоящей из очень большого количества узлов, каждый из которых выполняет свои операции и не заботится о том, чем занимается большинство других узлов. Поскольку все узлы выполняют предписанные им действия только тогда, когда прибывают все необходимые данные, не возникает и опасности преждевременного совершения какого-либо действия, например извлечения элемента данных из памяти, прежде чем туда будет записано нужное значение. Не возникает также опасности, что процессоры помешают друг другу, пытаясь, скажем, прочесть содержимое какой-либо ячейки памяти одновременно. Более того, не будут возникать и такие ситуации, когда два сообщения пытаются пройти по одному каналу связи в одно и то же время. Тем самым система, управляемая потоком данных, позволяет обойти самое узкое место в параллельных архитектурах.

Возможен и противоположный подход, воплощенный в системах, управляемых запросами. Машины, управляемые запросами, похожи на машины, управляемые потоком данных. Их также можно представлять в виде множества узлов, в которых выполняются операции, и дуг, по которым проходят данные. Разница между ними в том, что операция в каждом данном узле выполняется лишь тогда, когда какому-нибудь другому узлу потребуется результат данной операции. Выражения вычисляются лишь тогда, когда потребуются их результаты, в отличие от систем, управляемых потоками данных, где каждая операция выполняется, как только это становится возможным, а не тогда, когда это необходимо.

Системам, управляемым запросами, присуща некоторая дополнительная временная задержка: период времени, требующийся для того, чтобы сообщение от одного узла дошло до другого, того, который должен выполнить действие и послать результат первому. Преимущество систем, управляемых запросами, состоит в том, что для них легче составить надежную программу, чем для обычных параллельных машин. Пользователь должен лишь указать операции, которые следует выполнить в каждом узле, и потоки данных между узлами, не заботясь о технических подробно-

стях и временном согласовании шагов алгоритма.

В НАСТОЯЩЕЕ время исследователи уже обладают некоторым ограниченным опытом работы с высокопроизводительными вычислительными системами. Эксплуатация нескольких перспективных машин, в частности машин с архитектурой ОКМД, коммутационной машины, машины с архитектурой гиперкуба, созданной в Калифорнийском технологическом институте, и различных машин с разделением памяти, показала, что они дают хорошие результаты в широком диапазоне задач. Однако нужно отметить, что существующие параллельные машины и их программное обеспечение находятся еще в зачаточном состоянии. Пока было проведено мало количественных сравнений между машинами различных моделей. Поэтому, хотя мы уверены в том, что параллельные машины будут играть чрезвычайно важную роль в будущем и достигнут значительно более высокой производительности по сравнению с последовательными машинами, пока еще нельзя с уверенностью предсказать конкретные архитектуры или уровни быстродействия будущих машин.

Результаты, которые все же были достигнуты в создании параллельных систем, в значительной мере объясняются тем, что правительство и промышленные фирмы проявляют дальновидность, оказывая финансовую поддержку многим университетским разработкам. Это привело к появлению внушительного количества систем, охватывающих широкий диапазон архитектур. Мы полагаем, что на ближайшее будущее имеются очень хорошие перспективы для появления новых аппаратных средств. В то же время в отношении программного обеспечения мы не столь оптимистичны. Пока в этой важнейшей, но, может быть, не столь заметной области не наблюдается такой мощной финансовой поддержки. Для создания существующего арсенала последовательного программного обеспечения потребовалось более 30 лет. С помощью изолированных программных методов некоторую часть этого наследия, возможно, удастся приспособить для новых машин, однако для существенных сдвигов в этом направлении потребуется приложить много усилий по перестройке и переписыванию существующих пакетов программ для административно-хозяйственных и научно-исследовательских приложений.

Решающим шагом было бы принятие определенных стандартов. Такие языки, как Фортран, Кобол и Лисп,

послужили основными строительными блоками соответственно для фундаментальных научных исследований, административно-хозяйственных приложений и искусственного интеллекта на последовательных машинах. Конечно, эти языки не совершенны, однако они оказались достаточно хорошим средством для создания программного обеспечения, которое могло эволюционировать по мере развития аппаратных средств ЭВМ. Пока в мире параллельных машин такого понимания и согласия по поводу принятия аналогичных стандартов в программном обеспечении еще нет.

В БУДУЩЕМ на развитие параллельных систем, несомненно, окажут влияние новые технологии. Прогресс в полупроводниковой промышленности и, возможно, применение новых высокотемпературных сверхпроводящих материалов, конечно, приведут к новым решениям в разработке аппаратных средств. По всей видимости, появятся новые гибридные машины, в которых оптические каналы будут связывать цифровые процессоры, обладающие очень высоким быстродействием. Но эти достижения все же не изменят основных моделей вычислительных систем, которые мы здесь описали.

Более радикальных изменений можно ожидать от применения чисто оптических вычислительных систем, позволяющих проводить быстрые аналоговые вычисления по различным алгоритмам, которые сейчас реализуются на цифровой технике очень неуклюжими способами, а расчеты по ним занимают слишком много времени. Пока не известно, ограничится ли применение оптических компьютеров лишь некоторыми областями обработки сигналов или же на их основе будут созданы универсальные вычислительные системы.

Наконец, следует упомянуть о недавней работе, проведенной по разработке так называемых «моделей нейронных сетей». С интуитивной точки зрения они привлекательны, потому что дают вычислительную модель, в чем-то сравнимую с человеческим мозгом. Машина со структурой нейронных сетей потенциально имеет преимущество над обычными компьютерами в таких областях, как распознавание образов, хотя она и значительно слабее в применении к таким скромным задачам, как вычисления над числами с плавающей точкой. Исследователям уже удалось воплотить в аппаратуре несколько простых нейроноподобных систем, и мы ожидаем, что эта модель будет быстро эволюционировать, как в части аппаратуры, так и в алгоритмах.

Микросхемы для компьютеров

В 1959 г. на одном кристалле размещали один транзистор, сейчас — более миллиона. По мере того как полупроводниковая технология приближается к пределу своих возможностей, темпы роста уровня интеграции замедляются, однако к 2000 г. уже появятся кристаллы, содержащие миллиард компонентов

ДЖЕЙМС Д. МЕЙНДЛ

ПОЖАЛУЙ, самым значительным событием за последние 50 лет было то, что главным продуктом общественной деятельности стала информация. Движущей силой такого явления послужило развитие электронной технологии, в частности создание интегральных схем, формируемых на одном кристалле кремния. Начиная с 1959 г., когда впервые появились интегральные схемы, число транзисторов, размещаемых на кристалле, возросло с одного до нескольких миллионов. В результате рабочие характеристики интегральных схем улучшились более чем в 10 тыс. раз. Интересно отметить, что, несмотря на столь значительное улучшение характеристик и повышение уровня сложности, стоимость кристалла оставалась практически неизменной.

Когда речь идет о столь феноменальном технологическом прогрессе, естественно возникает вопрос: как долго он может продолжаться? Возможно, мы найдем ответ на этот вопрос, если выясним, когда будет налажен серийный выпуск кристаллов, содержащих один миллиард транзисторов, т. е. с плотностью соответствующей начальному этапу гигауровня интеграции.

Чтобы определить время появления таких кристаллов, необходимо проанализировать факторы, затрудняющие создание гигаисхем. Эти факторы можно классифицировать и выделить пять иерархических уровней, соответствующих фундаментальным физическим ограничениям, а также ограничениям, связанным с материалами и функционированием приборов, схем и систем. Каждый уровень может быть рассмотрен с трех точек зрения, а именно с точки зрения теории, практики и исторической аналогии.

Теоретические ограничения базируются на общепринятых научных пред-

ставлениях и по существу определяют принципиально достижимый уровень миниатюризации. Что касается практических ограничений, то они зависят не от научных представлений, а от технологических процессов и оборудования. Практические ограничения показывают, что может быть достигнуто на том или ином этапе в рамках существующей производственной технологии. С помощью исторической аналогии, в частности из сравнения с последним этапом промышленной революции, можно попытаться оценить долгосрочные перспективы наступившей информационной революции. Такое всестороннее рассмотрение поможет ответить на вопрос, когда же будет достигнут гигауровень интеграции. Получив ответ на этот вопрос, можно будет заглянуть еще дальше вперед, если учесть, что приборы, находящиеся сейчас еще в стадии лабораторных исследований, возможно, послужат толчком для наступления следующей фазы информационной революции.

В НАСТОЯЩЕЙ статье я начну с теоретического рассмотрения проблемы, затем перейду к практическим вопросам и в заключение обращусь к историческим аналогиям. Фундаментальные теоретические ограничения определяются объективными законами природы, которые нельзя изменить. Такие ограничения по сути не зависят ни от материала, применяемого для изготовления прибора, ни от конструкции прибора, ни от схемы, в которой этот прибор используется, ни от системы, в которую входит данная схема. Фундаментальные ограничения образуют первый (и наиболее общий) из иерархических уровней, о которых говорилось выше. Они определяют крайние пределы, за которыми лежат лишь «запрещенные» режимы работы.

Фундаментальные ограничения определяются законами, сформулированными в различных областях физики. Например, из законов термодинамики следует, что энергии атомов и электронов в кристалле полупроводника, из которого сделан транзистор, подвержены случайным статистическим флуктуациям. Между тем величина энергии электронов оказывает непосредственное влияние на сигнал, обрабатываемый транзистором. Если сигнал ненамного превосходит эти случайные флуктуации, то последние могут быть ошибочно приняты за сигнал. Таким образом, эти флуктуации определяют минимально возможную величину энергии переключения. Поскольку с ростом температуры флуктуации возрастают, увеличивается и минимально допустимая величина энергии, при которой должно происходить переключение прибора. Другие фундаментальные ограничения следуют из законов квантовой механики и из теории электромагнетизма (в последнем случае речь идет об ограничении, налагаемом скоростью света).

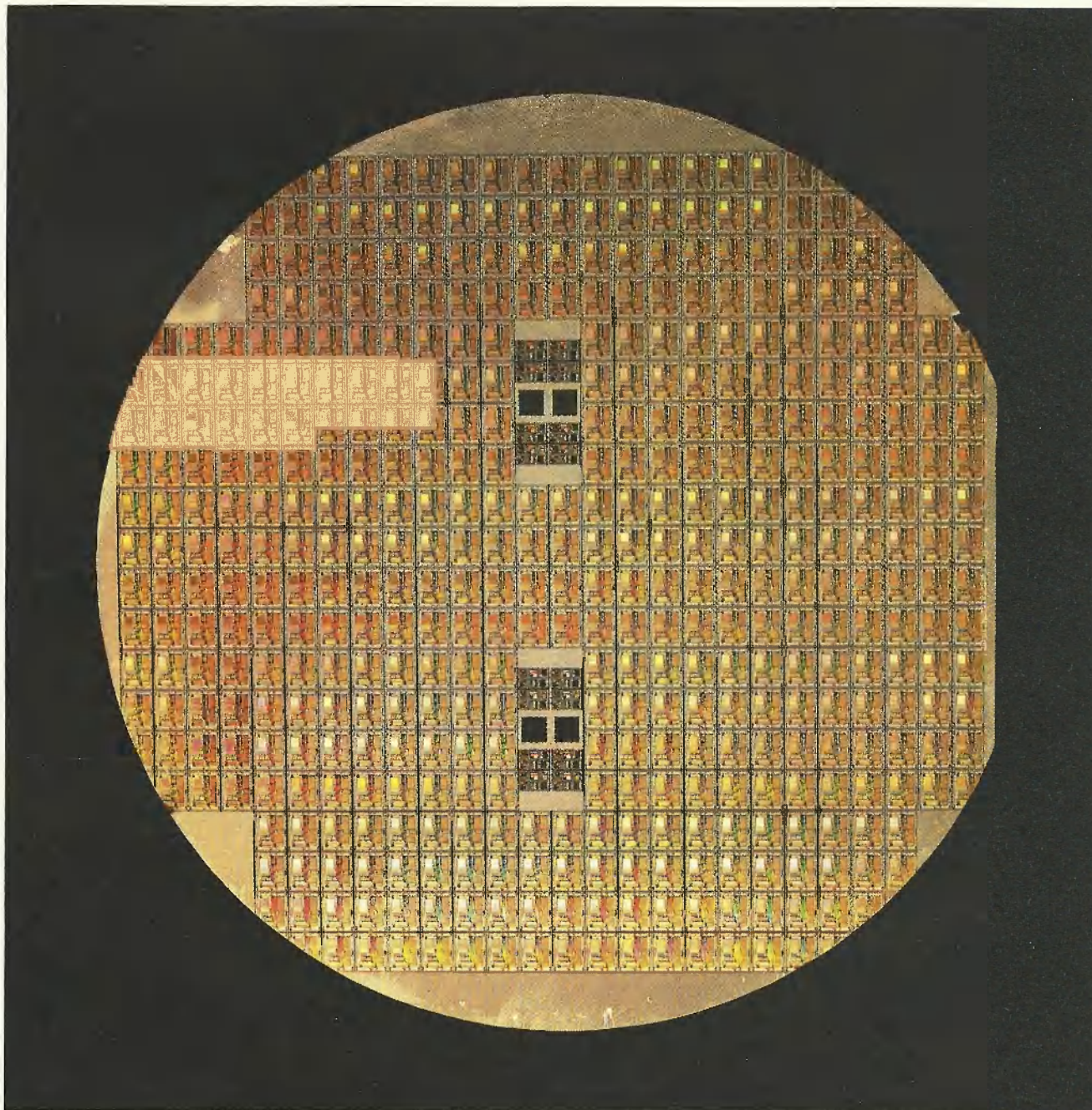
Ограничения, связанные с материалами, определяются химическим составом и структурой того или иного вещества, но не конфигурацией самого прибора. Когда речь идет о микроэлектронных схемах, то наибольший интерес представляют полупроводниковые материалы. Атомы, образующие кристаллическую решетку полупроводника, удерживаются вместе электронами, которые называются валентными: каждый атом кремния имеет четыре таких электрона. В обычных условиях валентные электроны прочно связаны с атомами решетки.

Эта ситуация может быть изменена путем легирования, т. е. введения в решетку примесных атомов, имеющих больше или меньше валентных

электронов, чем атом кремния. Одна из распространенных легирующих примесей, мышьяк, имеет на один валентный электрон больше, чем кремний. Этот лишний электрон может свободно перемещаться в решетке. Если к материалу приложено электрическое поле, свободные электроны, несущие отрицательный заряд, проводят электрический ток. Другие ле-

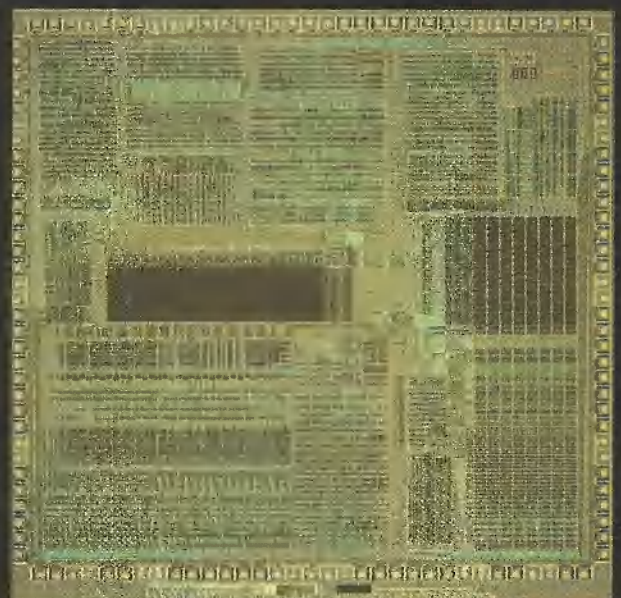
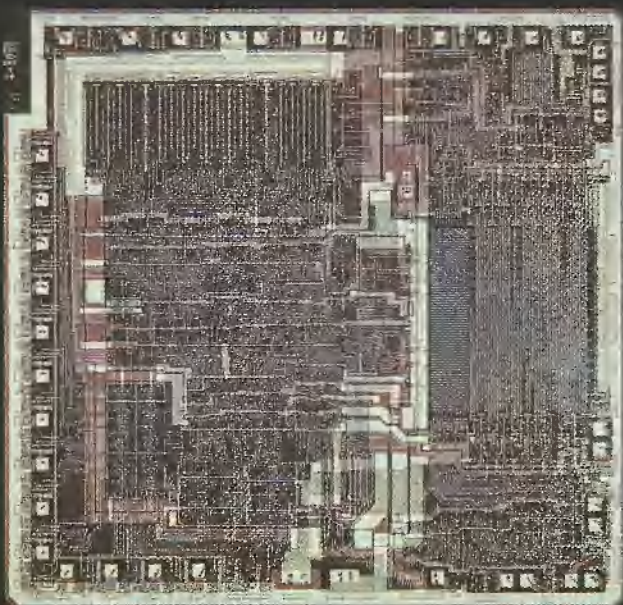
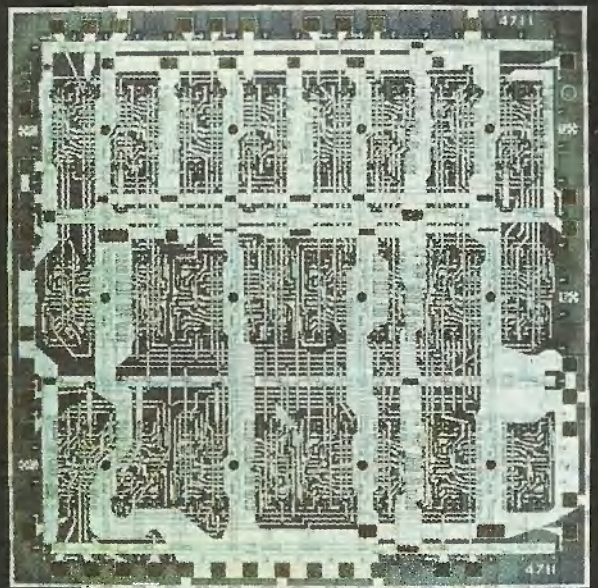
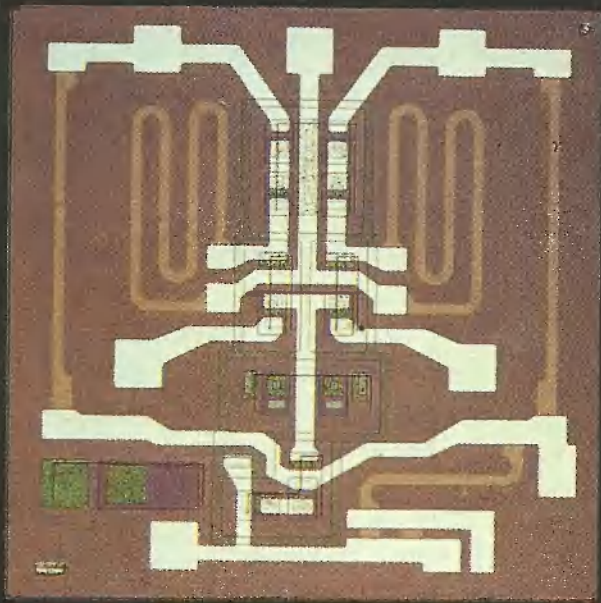
гирующие примеси, например бор, имеют на один валентный электрон меньше, чем кремний. «Дырка», образующаяся благодаря такому дефициту электронов, ведет себя как положительно заряженный переносчик тока. Выбирая соответствующий тип и концентрацию примеси, можно очень точно регулировать электрические свойства полупроводника.

Некоторые свойства кремния делают его необычайно подходящим материалом для интегральных схем. Одно из таких свойств — ширина его запрещенной зоны, или разность энергий валентных электронов и электронов проводимости. Если запрещенная зона слишком мала, то сравнительно небольшое увеличение температуры будет приводить к забрасыва-



ПЛАСТИНА КРЕМНИЯ содержит 470 компьютерных кристаллов, прошедших все стадии групповой технологической обработки. Пластина, показанная в реальном масштабе, отрезана от слитка кремния. Все имеющиеся на пластине кристаллы обрабатываются одновременно; расположенные вблизи центра прямоугольники — это тестовые схемы; они предназначены для контроля технологических процессов. После проверки, в процессе которой выявля-

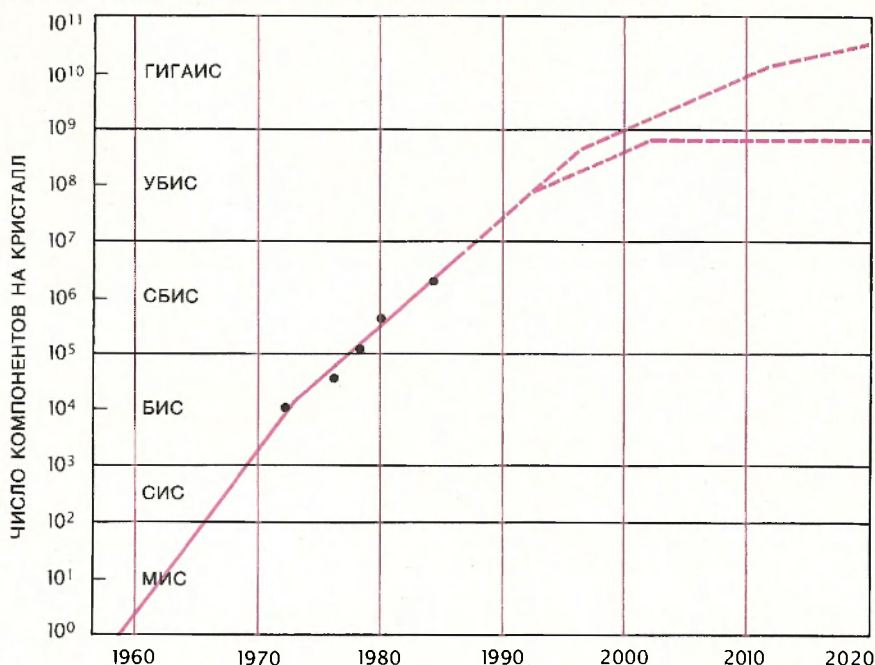
ются дефектные схемы, пластина разрезается на кристаллы алмазной дисковой пилой; годные схемы заделываются в корпуса. Здесь показаны кристаллы типа PACE 1750A, изготавливаемые фирмой Performance Semiconductor Corporation. Каждый из них представляет собой центральный процессор мини-компьютера; они используются в военной бортовой аппаратуре и других системах.



ванию большого количества электронов в зону проводимости, а это будет мешать прецизионному контролю электрических свойств прибора. Между тем кремний имеет ширину запрещенной зоны 1,12 эВ. Такая ширина вполне достаточна для того, чтобы материал заведомо сохранял свои полупроводниковые свойства в широком диапазоне температур вблизи 300 К (или 27 °С, т. е. вблизи комнатной температуры).

НО ЭТО ЕЩЕ НЕ ВСЕ. Достоинство кремния состоит также в том, что этот полупроводник часто встречается в природе и из него можно формировать почти идеальные кристаллы при сравнительно малых затратах. Кроме того, его собственный окисел, диоксид кремния (SiO_2), — прекрасный изолятор, по своим свойствам весьма удобный для использования в интегральных схемах. Ни один другой материал не обладает такой совокупностью достоинств, поэтому неудивительно, что кремний преобладает в технологии интегральных схем. Однако в последние годы, когда начали сказываться некоторые существенные кремниевые ограничения, важную роль стал играть другой полупроводниковый материал — арсенид галлия (GaAs).

Главная причина, по которой разработчики интегральных схем обратились к арсениду галлия, — необходимость повышения быстродействия. Под действием небольшого электрического поля электроны в зоне проводимости арсенида галлия дрейфуют в шесть раз быстрее, чем в кремнии. Если, однако, использовать в качестве критерия только дрейфовую подвижность электронов, можно переоценить преимущества арсенида галлия. Более точным критерием для сравнения может служить другой параметр материала, а именно время, за которое носитель, находящийся в электрическом поле, близком к полю пробоя, перемещается на расстояние, соответствующее изменению электрического потенциала на определенную величину, скажем на 1 В. (Электрическое поле пробоя — это поле, под действием которого из решетки осво-



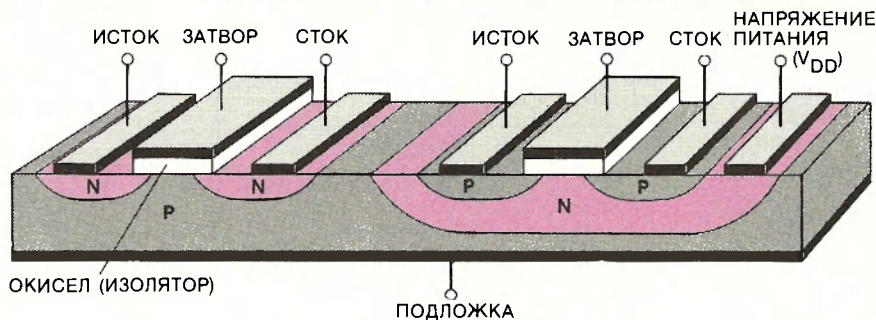
бождается так много валентных электронов, что начинается лавинный процесс самоионизации.) По этому параметру арсенид галлия примерно в 2,5 раза превосходит кремний. Таким образом, если судить по некоторым параметрам материала, то арсенид галлия обладает преимуществом перед кремнием в отношении быстродействия. Однако по мере уменьшения размеров транзисторов это преимущество может быть сведено на нет другими факторами, также связанными со свойствами материала. Скорость переключения транзистора можно повысить, если подать на него большую мощность, но при этом возрастет выделение тепла в приборе. Для очень малых приборов скорость переключения может ограничиваться способностью подложки

отводить тепло от прибора. Поскольку теплопроводность кремния в три раза выше, чем арсенида галлия, может оказаться, что кремниевые приборы очень малых размеров имеют такую же скорость переключения, как и приборы из более «быстродействующего» материала.

Поэтому, на каждом уровне иерархии следует выбирать компромиссное решение, учитывая противоречащие друг другу ограничения. Умение находить компромиссное решение особенно важно на уровне прибора. Ограничения, связанные с функционированием прибора, весьма многочисленны, поскольку они определяются как свойствами материала, так и размером и геометрией прибора. Но при всем разнообразии ограничений можно довольно четко сформулировать ключевую проблему, которая возникает на уровне прибора, когда решается задача создания схем гигауровня интеграции: проблема состоит в том, чтобы определить минимально возможные размеры полевого транзистора со структурой металл—окисел—полупроводник, т. е. МОП-транзистора.

Обычный МОП-транзистор состоит из слоя кремния, легированного примесью, которая создает повышен-

РАЗВИТИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ шло по пути непрерывного повышения плотности упаковки. Об этом наглядно свидетельствуют шесть образцов схем, изготовленных фирмой Fairchild Semiconductor Corporation за период с 1959 по 1985 г. Вверху: слева — первый планарный транзистор (1959 г.), справа — первая интегральная схема на одном кристалле (1961 г.); она содержит четыре транзистора и другие компоненты. В центре: слева — первая линейная интегральная схема (1964 г.) с пятью транзисторами, справа — биполярная логическая матрица (1968 г.), содержащая 180 транзисторов. Внизу: слева — первый кристалл с полной схемой центрального процессора (1978 г.), в нем 20 000 транзисторов; справа — кристалл центрального процессора типа CLIPPER (1985 г.) на 132 000 транзисторов.



КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ МОП-ТРАНЗИСТОРЫ составляют основу наиболее распространенной технологии изготовления интегральных схем. МОП-транзистор — это полевой транзистор со структурой металл—окисел—полупроводник. Электрический заряд в полупроводнике, в частности в кремнии, может переноситься электронами (отрицательно заряженные носители) или «дырками» (положительно заряженные носители). В кремнии *n*-типа преобладают электроны, в кремнии *p*-типа — «дырки». Каждый тип полупроводника содержит также небольшое количество носителей противоположного знака. Когда на затвор подано запирающее напряжение, между истоком и стоком не протекает никакого тока. При подаче отпирающего напряжения неосновные носители собираются под затвором, создавая таким образом индуцированный канал. При этом на выходе прибора протекает большой ток. На рисунке показаны два спаренных комплементарных МОП-транзистора (у одного из них канал *n*-типа, у другого — канал *p*-типа), сформированных на одном кристалле.

ную концентрацию носителей положительного заряда (кремний *p*-типа), и сформированных в этом слое двух островков кремния, легированного примесью, которая создает повышенную концентрацию отрицательно заряженных носителей (кремний *n*-типа). Эти островки, называемые истоком и стоком, соединяет расположенный на поверхности слой диоксида кремния, который играет роль изолятора. Поверх изолятора между истоком и стоком наносят металлический электрод — затвор. При подаче положительного «входного» напряжения на затвор электроны притягиваются к границе раздела между кремниевой подложкой и изолятором. Эти электроны образуют индуцированный канал, благодаря чему от истока к стоку течет «выходной» ток, и в следующий каскад схемы поступает логический сигнал. В отсутствие входного сигнала канал не формируется и никакого выходного тока не возникает.

ПОСКОЛЬКУ МОП-технология стала преобладающей в цифровой электронике, работа по достижению гигауровня интеграции сводится все к новым попыткам пропорциональной миниатюризации МОП-структур. Процесс пропорциональной миниатюризации начинается с выбора коэффициента миниатюризации, который обычно обозначают буквой *S*. Затем все горизонтальные и вертикальные размеры МОП-структуры уменьшают в *S* раз. (Так, если коэффициент миниатюризации равен 2, высоту и ширину структуры

следует уменьшить вдвое по сравнению с исходными значениями.) Во столько же раз уменьшают и напряжение питания, с тем чтобы напряженность электрического поля оставалась постоянной, а не возрасла.

Одновременное уменьшение размеров и приложенного напряжения дает замечательные результаты. Время, требующееся для переключения прибора, которое зависит от длины канала, уменьшается в *S* раз. Мощность, рассеиваемая на единице площади кристалла, остается постоянной, так что проблема отвода тепла не становится более серьезной. Плотность размещения транзисторов на кристалле, которая зависит от площади транзисторной структуры, возрастает в *S*² раз. Таким образом, в результате пропорциональной миниатюризации получается кристалл с большим числом приборов, большей скоростью переключения и меньшей потребляемой мощностью в расчете на один транзистор.

Понятно, что разработчик кристаллов, знакомый с преимуществами пропорциональной миниатюризации, хотел бы знать, каковы пределы такой миниатюризации. На это можно ответить, что предел определяется минимально допустимой длиной канала МОП-транзистора. Минимальная длина канала в свою очередь в значительной степени определяется допустимыми значениями напряжения питания и концентрации легирующей примеси (обычно бора) в подложке *p*-типа, в которой сформирован канал. Во всех случаях, когда образуется переход между материалами *n*- и *p*-

типов, носители заряда мигрируют на противоположную сторону от границы раздела, где их концентрация ниже: электроны мигрируют в область *p*-типа, а дырки — в область *n*-типа. В результате формируется так называемый слой пространственного заряда, в котором отсутствуют электроны и дырки. Чтобы транзистор функционировал правильно, канал должен быть по меньшей мере вдвое длиннее этого слоя.

Если длину канала желательно сделать минимальной, очевидно, следует уменьшить длину области пространственного заряда, а этого в свою очередь можно добиться путем увеличения концентрации легирующей примеси. Однако увеличение концентрации примеси приводит к нежелательным последствиям, а именно оно вызывает необходимость увеличения напряжения питания. Если напряжение питания окажется слишком большим, окисидный диэлектрик под затвором начнет пробиваться в результате упомянутого выше эффекта самоионизации. Таким образом, минимально возможная длина канала определяется компромиссными значениями напряжения питания и концентрации примеси. Можно показать, что при типичных для существующей технологии значениях напряжения питания и концентрации примеси минимальная длина канала составляет от 0,1 до 0,2 мкм. На сегодняшний день этот предел можно считать чисто теоретическим: существующие МОП-транзисторы имеют длину канала от 1 до 2 мкм.

Если приборы существенно выигрывают от пропорциональной миниатюризации, то этого никак нельзя сказать о тонкопленочных металлических проводниках, соединяющих расположенные на кристалле транзисторы. Во-первых, при миниатюризации транзисторов не все соединения между ними становятся короче. За последние два десятилетия размеры транзисторов уменьшились, но сами кристаллы стали больше. В результате дальние соединения (связывающие, например, транзисторы, которые расположены в противоположных углах кристалла) стали длиннее. Увеличение их длины часто описывается с помощью «коэффициента увеличения размеров кристалла» *S_c* (имеется в виду увеличение линейных размеров кристалла).

ЧТО КАСАЕТСЯ локальных соединений, связывающих между собой соседние транзисторы, то их длина действительно уменьшается пропорционально коэффициенту миниатюризации *S*. Однако даже на локаль-

ные соединения пропорциональная миниатюризация оказывает неблагоприятное воздействие. Электрические характеристики проводников таковы, что при одновременном уменьшении площади поперечного сечения и длины проводника время, необходимое для передачи сигнала по этому соединению, может вовсе не уменьшиться. На практике время задержки имеет тенденцию оставаться постоянным. Кроме того, с увеличением коэффициента S плотность тока в соединительном проводнике возрастает. Если плотность тока становится достаточно большой, материал проводника может увлекаться током, и тогда остаются пустоты. Этот эффект, называемый электромиграцией, может в конечном итоге приводить к полному выходу из строя того или иного соединения.

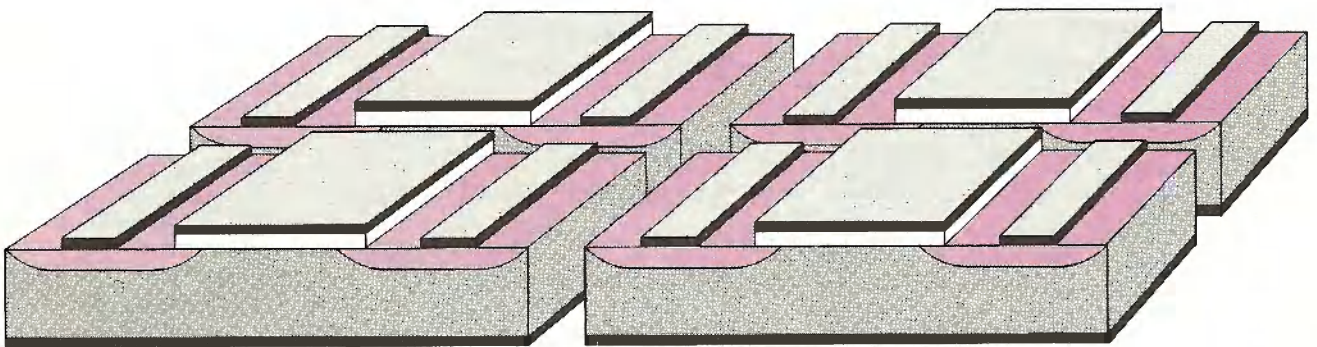
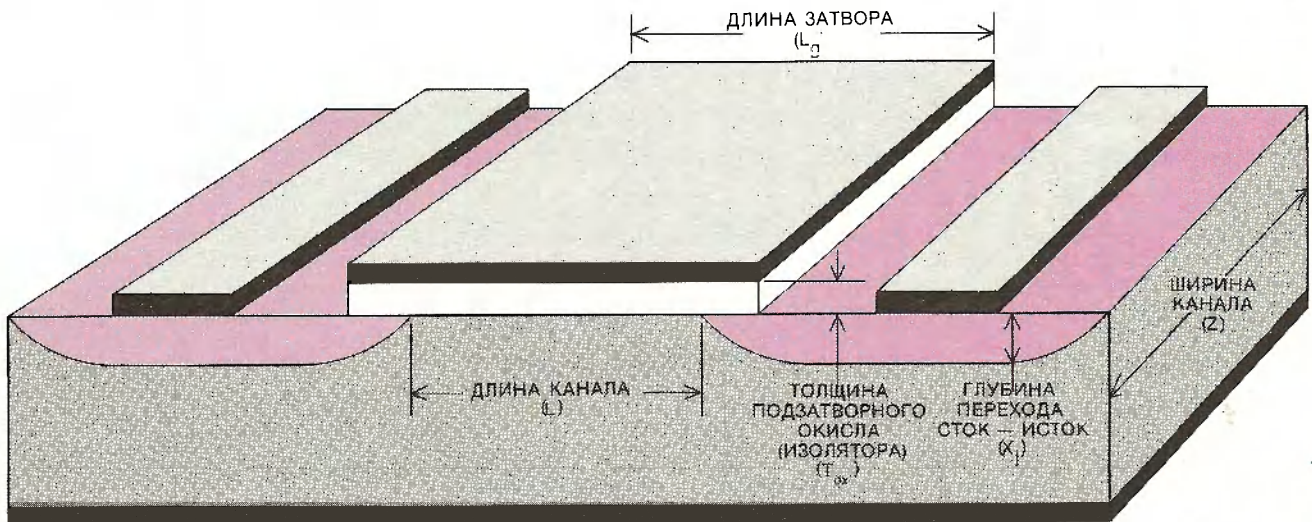
За ограничениями, связанными с функционированием приборов, следу-

ют ограничения, возникающие на схемном уровне. Здесь одна из главных проблем состоит в том, чтобы определить минимальную величину напряжения питания, при которой может работать базовая логическая схема. Самая элементарная логическая схема — это, по-видимому, схема инвертора, которая входит в состав почти всех сложных микроэлектронных схем. Инвертор преобразует низковольтный входной сигнал («0» на цифровом языке компьютера) в высоковольтный выходной («1») или наоборот.

Наверное, самая замечательная логическая схема, широко используемая во всех кристаллах высокого уровня интеграции, — это инвертор, содержащий два МОП-транзистора, один с каналом n -типа и другой с каналом p -типа. Такую комбинацию называют комплементарной МОП-структурой. Пока не происходит переключения,

один из приборов обязательно находится в открытом состоянии (проводит ток), а другой — в закрытом (не проводит ток). Поскольку приборы соединены последовательно, схема, когда она не переключается, почти не потребляет мощности. Из анализа схемных характеристик следует, что минимальная величина напряжения питания, при которой может работать инвертор, составляет примерно 0,1 В при комнатной температуре.

Столь низкое потребление мощности — одна из причин того, что комплементарные МОП-структуры быстро стали преобладающим типом приборов для обработки информации. Существует и другая причина: структуры подобного типа в меньшей степени подвержены действию такого ограничения, как минимально допустимая длина канала. Я уже говорил, что минимально допустимая длина канала действует в качестве



ПРОПОРЦИОНАЛЬНАЯ МИНИАТЮРИЗАЦИЯ МОП-транзисторов дает существенные преимущества. Для этого сначала выбирается коэффициент пропорциональной миниатюризации (S). Все линейные размеры уменьшаются в S раз. Во столько же раз уменьшается и напряжение питания. В данном случае $S = 2$. Как показывает нижний рисунок, плотность упаковки возрастает пропорционально S^2 .

Задержка распространения, т. е. время, за которое электрон или дырка пересекают канал, уменьшается в S раз. Плотность мощности рассеяния остается постоянной, поскольку и напряжение питания, и ток уменьшаются пропорционально S . Энергия, необходимая для переключения, уменьшается в S^3 раз.

ограничения на уровне прибора. К этому следует добавить, что когда речь идет о МОП-транзисторах с коротким каналом, то оказывается, что минимально допустимая длина канала зависит также от конфигурации

схемы, в которой используются эти транзисторы. Нетрудно показать, что комплементарные МОП-структуры могут иметь самую малую длину канала — от 0,10 до 0,15 мкм. Повышение быстродействия, сопро-

вождающее такое сужение канала, — еще один аргумент в пользу комплементарных МОП-приборов.

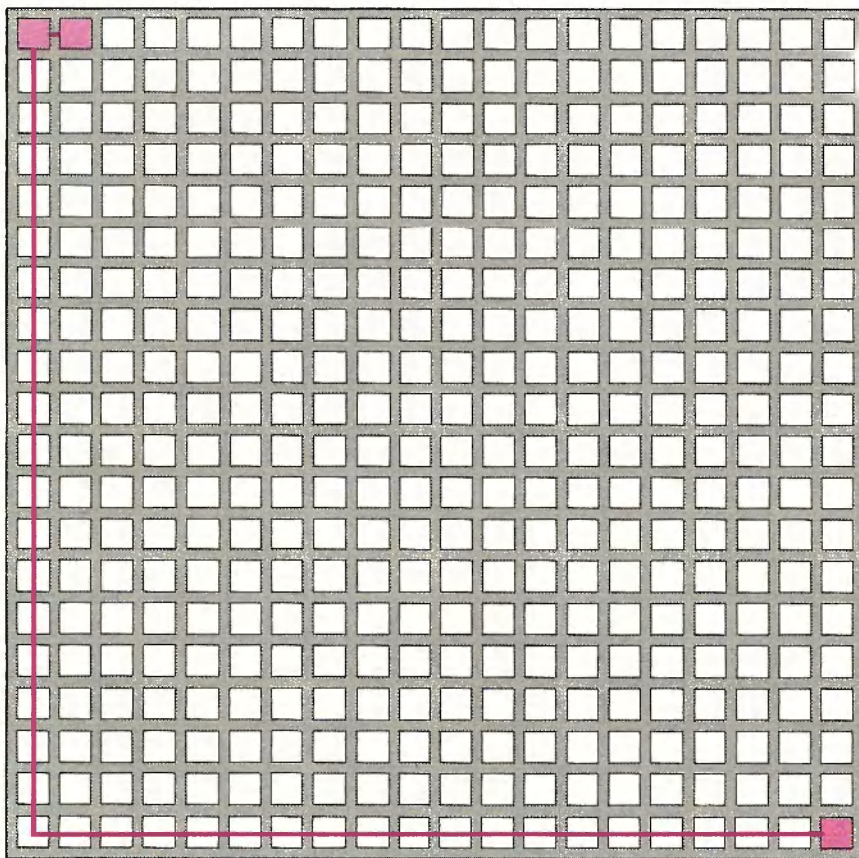
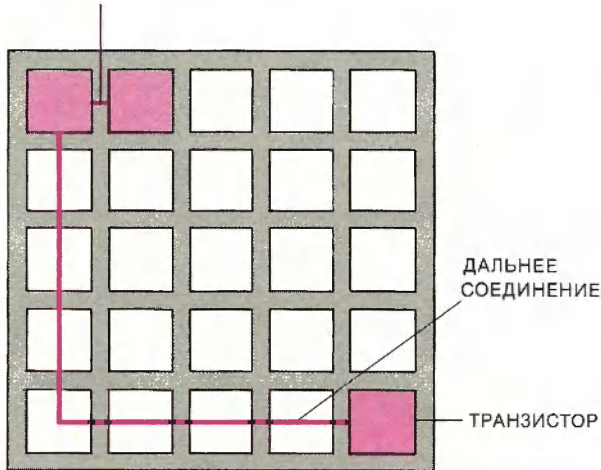
На самом верхнем уровне иерархии — системном — главная задача состоит в том, чтобы сформировать модель, связывающую параметры более низкого уровня с общей архитектурой системы и типом корпуса. Мне известна только одна модель такого рода, а именно та, которую недавно создал Б. Бакоглу в бытность его одним из моих аспирантов в Станфордском университете. Модель, которую мы называем SUSPENS, частично базируется на формуле, известной как правило Рента. Это правило, которое было сформулировано в 60-х годах и стало широко известно специалистам по компьютерам в 70-х, связывает число логических схем на кристалле с числом проводников, необходимых для соединения этих схем между собой и с системой. Из правила Рента можно вывести формулу для определения средней длины межсоединений на кристалле.

Модель, базирующаяся на правиле Рента, содержит 26 параметров. Из них восемь входят непосредственно в правило Рента и характеризуют архитектуру кристалла и системы. Четыре параметра относятся к технологии изготовления транзисторов, пять — к разводке кристалла и девять — к соединениям между модулями (входящими в систему сборками, содержащими один или более кристаллов). Введя в модуль значения всех 26 параметров, разработчик может получить максимальную частоту синхронизирующих импульсов, задающих «темп» работы системы, оптимальный размер кристалла и суммарную величину мощности рассеяния. Располагая такой информацией, он может определить оптимальное число транзисторов на кристалл и проверить, как переход на ту или иную новую технологию скажется на функционировании системы.

МОДЕЛЬ системы, которая учитывает ограничения, действующие на нескольких уровнях, позволяет оценить теоретически пределы миниатюризации. Но существуют и практические пределы, которые определяются тремя параметрами: минимальным размером элементов, размером кристалла и плотностью упаковки. Минимальный размер элементов — это горизонтальный размер наименьшего различимого элемента МОП-транзистора или металлического соединения. Типичный пример — длина затвора МОП-транзистора, которая несколько больше длины канала.

В 1960 г. средний минимальный размер элементов интегральных схем

ЛОКАЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ



ПРОПОРЦИОНАЛЬНАЯ МИНИАТЮРИЗАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ между приборами далеко не так благоприятно сказывается на характеристиках схемы, как миниатюризация самих приборов. В то время как размеры приборов уменьшаются, размеры кристаллов растут. Увеличение площади кристалла характеризуется коэффициентом пропорционального увеличения длины сторон (S_c). На рисунке схематически показано, как происходит повышение уровня интеграции. Здесь S (коэффициент пропорционального уменьшения размеров прибора) и S_c равны 2. В то время как длина локальных соединений, связывающих соседние приборы, уменьшается в S раз, длина дальних соединений имеет тенденцию увеличиваться пропорционально S_c .

составлял около 25 мкм. К 1980 г. он снизился до 2,5 мкм. Если бы минимальный размер элементов продолжал снижаться такими же темпами, то к 2000 г. он достиг бы 0,25 мкм, что ненамного больше упомянутых выше теоретических предельных значений для приборного и схемного уровней. Однако трудно ожидать, что удастся так близко подойти к теоретическому пределу, поэтому мало вероятно, что наблюдавшиеся до сих пор темпы снижения минимальных размеров — 11% в год — сохранятся в 90-х годах. В пользу такого вывода говорит также тот факт, что минимальный размер элементов уже начал приближаться к пределу разрешающей способности установок оптической литографии, используемых для изготовления интегральных схем. Этот предел (он составляет примерно 0,5 мкм) определяется минимальной длиной волны видимого излучения.

По мере того как минимальный размер элементов уменьшался, площадь кристалла постоянно росла. Для сравнения обычно служит размер стороны квадрата кристалла, типичный для данного периода. В 1960 г. этот размер составлял 1,4 мм, а в 1980 г. — 8 мм. Если такая тенденция роста сохранится до 2000 г., то длина сторон кристалла будет к тому времени составлять 50 мм. Однако существуют некоторые практические ограничения, и это заставляет предположить, что темпы роста замедлятся. В оптической литографии с увеличением поля зрения ухудшается разрешающая способность. Кроме того, поскольку кристалл обычно травится как единое целое, то для вытравливания достаточно малых элементов приходится ограничивать размер кристалла. Более реалистичным выглядит прогноз, согласно которому размер стороны кристалла в 2000 г. будет составлять от 20 до 40 мм.

Плотность упаковки, как видно из названия, — это параметр, показывающий, насколько плотно могут быть размещены транзисторы на кристалле. С 1960 г. плотность упаковки очень сильно возросла благодаря усовершенствованию технологии и модернизации схем и приборов. Вплоть до 1972 г. рост был стремительным, но затем проектировщики исчерпали все резервы свободной площади кристалла, заполнив все имеющееся пространство транзисторами и соединениями. После этого рост плотности упаковки замедлился, в ход пошли такие приемы, как совершенствование структуры транзисторов, увеличение числа операций фотолитографии в технологическом цикле и даже созда-

ПАРАМЕТР СОЕДИНЕНИЯ	ДО МИНИАТЮРИЗАЦИИ	ПОСЛЕ МИНИАТЮРИЗАЦИИ
ДЛИНА БЛИЖНЕГО ДАЛЬНОГО	L L	L/S S _c L
ТОЛЩИНА	W	W/S
ШИРИНА	H	H/S
СОПРОТИВЛЕНИЕ БЛИЖНЕГО ДАЛЬНОГО	R R	S _c R S _c ² R
ЕМКОСТЬ БЛИЖНЕГО ДАЛЬНОГО	C C	C/S S _c C
ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ БЛИЖНЕГО ДАЛЬНОГО	RC RC	RC (S _c) ² RC
ПЛОТНОСТЬ ТОКА	J	SJ

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ при пропорциональной миниатюризации создает несколько проблем. Во-первых, время задержки распространения (время, за которое сигнал проходит через соединение) для соединений дальнего порядка увеличивается пропорционально произведению коэффициентов S и S². Во-вторых, плотность тока в соединении увеличивается пропорционально S, что может со временем приводить к образованию пустот в проводниках и в конечном итоге — к их разрушению.

ние трехмерных схем, размещающихся не только на поверхности кристалла, но и выше или ниже поверхности.

Совместным результатом измененный минимального размера элементов, площади кристалла и плотности упаковки явился быстрый рост числа компонентов на кристалле. Это — одно из самых замечательных явлений в истории техники. Начиная с 1959 г., когда число приборов на кристалл было равно единице, это число с каждым годом удваивалось. В 70-х годах,

когда стали сказываться упомянутые выше практические ограничения, рост замедлился, но темпы все еще оставались весьма высокими — каждые три года число компонентов на кристалл возрастало в четыре раза. Такие темпы должны сохраниться вплоть до начала 90-х годов, когда начнут действовать другие ограничения, которые, по-видимому, приведут к новому снижению темпов роста. Тем не менее ответ на вопрос, поставленный в начале настоящей статьи, гласит: кри-

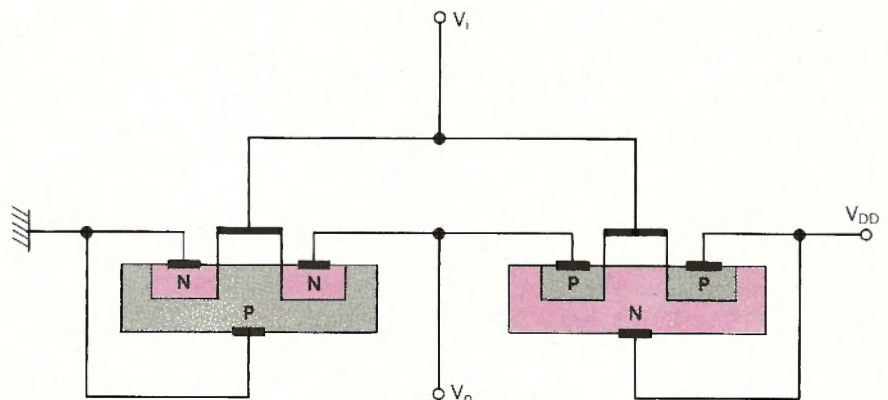
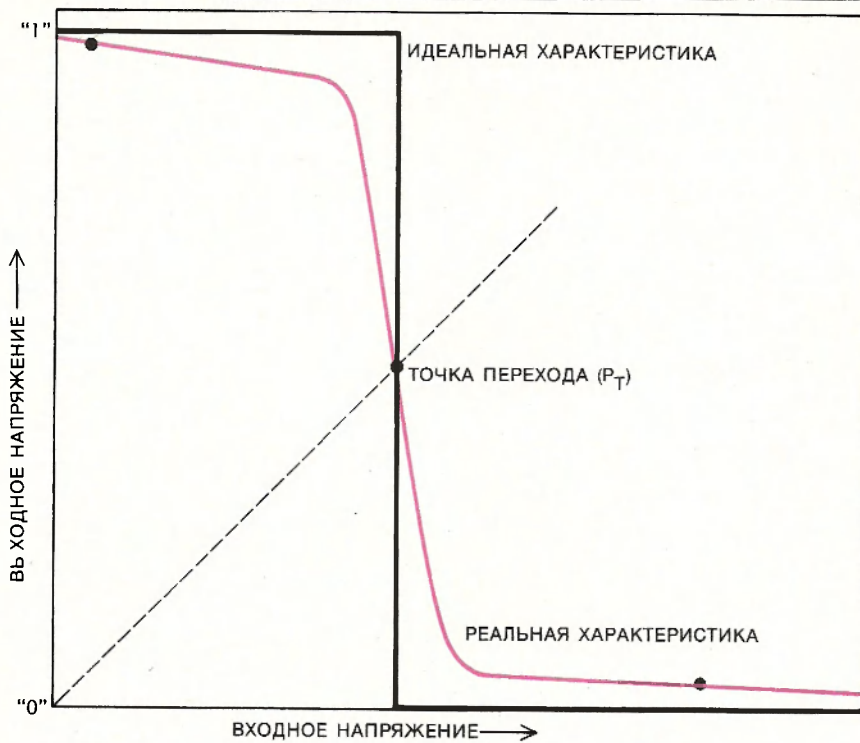


СХЕМА ИНВЕРТОРА содержит комплементарные МОП-транзисторы. Инвертор — одна из базовых логических схем. Он преобразует низковольтный входной сигнал («0») в высоковольтный выходной («1») или наоборот. За исключением моментов переключения, один из МОП-транзисторов обязательно находится в закрытом состоянии (не проводит ток), а другой — в открытом (проводит ток). Поскольку приборы соединены последовательно, схема потребляет очень малую мощность в то время, когда не происходит переключения. Малое потребление мощности — одно из важных преимуществ интегральных схем на комплементарных МОП-транзисторах.



ПЕРЕДАТОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА инверторной схемы, показанной на предыдущем рисунке, представляет собой зависимость выходного напряжения от входного. В идеале эта характеристика должна быть в виде прямоугольной ступеньки. Если бы это было так, наклон характеристики в точке перехода от высокого выходного напряжения к низкому был бы бесконечно велик. На практике это условие не выполняется, но характеристика инвертора на комплементарных транзисторах ближе к идеальной, чем характеристика какой-либо другой схемы.

сталл гигауровня интеграции, т. е. кристалл с 1 млрд. компонентов, должен быть создан к 2000 г.

Однако появление таких кристаллов не сразу скажется на уровне электронной техники. Прошлый опыт показывает, что объем производства интегральных схем нового типа достигнет своего пика лишь через три-пять лет после того, как эти схемы впервые поступят в продажу. (Такая задержка необходима для того, чтобы спрос на схемы достаточно возрос и изготовитель мог ввести в действие все свои производственные мощности.) Поэтому максимальный эффект от появления кристаллов, содержащих миллиард компонентов, ощутится, по-видимому, не ранее чем после 2005 г. Таким образом, учитывая как практические, так и теоретические ограничения, можно предположить, что на протяжении ближайших двадцати лет информационная революция будет развиваться такими же бурными темпами, как и до сих пор.

Побывав в царствах теории и практики, я хотел бы отвлечься от науки и техники как таковых и обратиться к истории, чтобы найти в ней аналогии, которые позволили бы заглянуть в будущее информационной револю-

ции. Историки часто замечали, что популярные технические направления имеют тенденцию следовать S-образной кривой развития. Вначале развитие идет медленно и в основном в стенах лаборатории. После выпуска первых серийных изделий и следующего за этим осознания практической важности нового направления в данную технологию начинают вкладываться значительные средства, и затем наступает период быстрого роста. По мере того как начинают сказываться фундаментальные ограничения и технология приближается к своим предельным возможностям, развитие замедляется, и кривая достигает максимума, после чего технология начинает устаревать.

Существуют признаки того, что информационная революция следует описанной тенденции — подобно промышленной революции, начавшейся в XVIII в. Проводя аналогии между этими двумя техническими переворотами, возможно, удастся определить, на каком участке S-образной кривой находится сейчас информационная революция. Я думаю, никто не будет отрицать, что железо было материалом, сыгравшим самую важную роль в промышленной революции. В этом

смысле его можно уподобить кремнию — ключевому материалу в информационной революции. Железо в сочетании с другими элементами образует легированные стали, а кремний, легированный примесными атомами, служит исходным материалом для изготовления интегральных схем. Этот ряд аналогий может быть легко продолжен на приборном уровне (транзистор и поршень), на схемном уровне (интегральная схема и двигатель внутреннего сгорания) и системном уровне (компьютер и транспортное устройство).

Вспомним теперь, что с 1860 по 1900 г. годовой объем производства стали в США удваивался каждые четыре года. К концу этого периода была достигнута вершина S-образной кривой, т. е. наступило насыщение: с 1900 по 1985 г. объем производства стали оставался примерно постоянным. Между тем производство кремния все еще находится на крутом участке S-образной кривой. Вот уже более десяти лет объем производства удваивается каждые два года. Более того, как я указывал выше, можно ожидать, что по достижении гигауровня интеграции быстрый рост производства будет продолжаться еще два десятилетия. Однако затем, по-видимому, будет достигнут пологий участок кривой, и рост производства кремния прекратится или по крайней мере замедлится.

Следует отметить, что даже в условиях, когда производство стали находится на вершине S-образной кривой, сталь остается главным промышленным материалом, если использовать в качестве критерия объем выпускаемой продукции в тоннах. Однако производство других материалов, таких, как алюминий, титан, пластмассы и композиционные материалы, растет гораздо быстрее, чем производство стали. Производство интегральных схем должно, по-видимому, следовать аналогичной тенденции. Кремний, несомненно, останется главным материалом, но в фокусе научных исследований окажутся другие материалы, и именно они послужат основой для дальнейшего экономического роста. Речь идет о таких материалах, как криогенные сверхпроводящие структуры для интегральных схем, тонкие пленки полупроводников на изолирующей подложке и многослойные структуры, сформированные из нескольких материалов с помощью молекулярно-лучевого осаждения. Из этого перечисления видно, что рост не обязательно прекращается даже тогда, когда достигается вершина S-образной кривой.

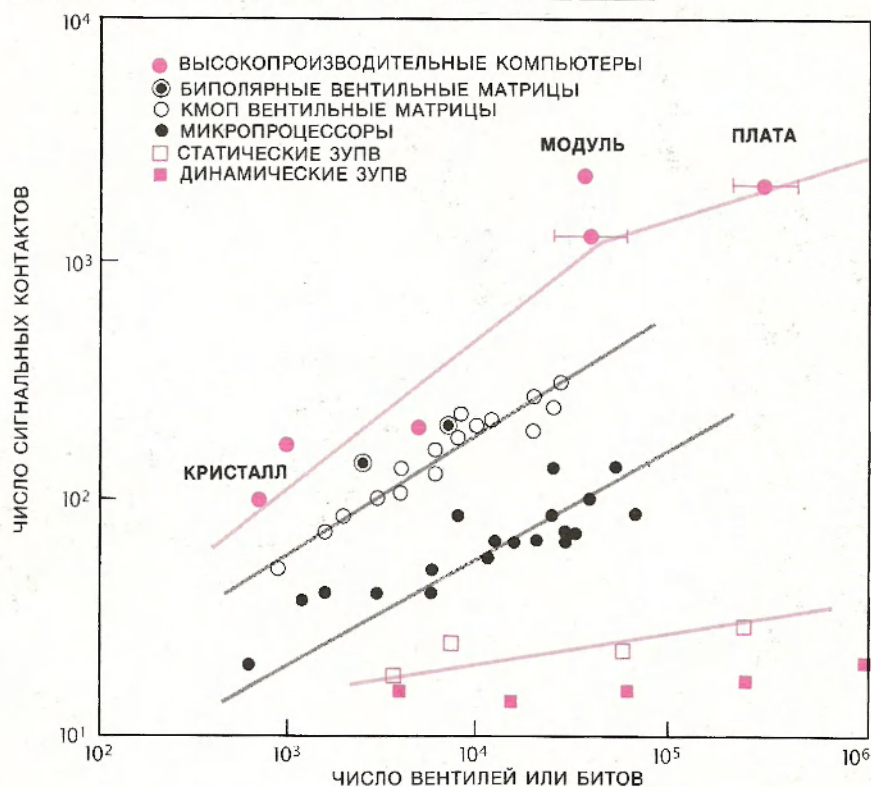
В истории техники есть вдохновля-

ющие примеры возникновения «разрывов непрерывности»: в некоторые моменты установленные границы нарушаются, и неожиданно открываются новые горизонты. Такие скачки бывают обусловлены открытиями или изобретениями, которые принципиально изменяют представления о будущем. Существует несколько новых идей, которые могут сыграть такую революционную роль в технологии интегральных схем. Суть этих идей сводится к использованию совершенно иной шкалы расстояний при проектировании полупроводниковых приборов.

В одном случае речь идет о расстоянии, на которое может перемещаться в кремнии носитель заряда (электрон или дырка), прежде чем он столкнется с колеблющимся атомом кремния или атомом легирующей примеси. Это расстояние называют средней длиной свободного пробега; чем оно больше, тем быстрее движутся носители. Можно увеличить среднюю длину свободного пробега путем простой замены кремния арсенидом галлия, как это сделано в полевом транзисторе со структурой металл—полупроводник (МЭП-транзистор). Более радикальное решение — полевой транзистор с модулированным легированием (МОД-транзистор), который содержит тонкий слой арсенида алюминия-галлия, осажженный на подложку из нелегированного арсенида галлия. Благодаря отсутствию примесных атомов средняя длина свободного пробега возрастает, поэтому МОД-транзистор обладает большим быстродействием, чем МЭП-транзистор, а последний в свою очередь превосходит МОП-транзистор.

Перейдя к расстояниям, чуть меньшим чем длина свободного пробега, можно добиться дальнейшего увеличения скорости носителей. Когда длина канала становится равной средней длине свободного пробега электрона или меньше ее, электрон может проходить через канал, вообще не претерпевая столкновений. Такое движение без столкновений называют баллистическим движением. Баллистическая скорость, достигаемая электроном при перемещении на короткие расстояния, может быть в несколько раз больше дрейфовой скорости, характеризующей движение со столкновениями, какое преобладает в тех случаях, когда длина канала превышает среднюю длину свободного пробега. Баллистические транзисторы представляют собой еще одно направление совершенствования интегральных схем, заслуживающее серьезного внимания.

Перейдя к еще меньшим расстояни-



ПРАВИЛО РЕНТА определяет соотношение между числом логических схем на кристалле и числом выводов, требующихся для соединения кристалла с системой. Это эмпирическое соотношение было получено в 60-х годах, когда уже был накоплен достаточный опыт в области проектирования интегральных схем. Правило Рента лежит в основе обобщенной модели, связывающей характеристики материалов, приборов и схем с характеристиками системы, в которой те или иные интегральные схемы должны использоваться. (Обозначения на рисунке: КМОП — на комплементарных МОП-транзисторах; ЗУПВ — запоминающее устройство с произвольной выборкой.)

ям, мы получим квантовый режим работы, проявляющийся на расстояниях, меньших средней длины свободного пробега. Эта длина в кремнии составляет примерно 10 нм (нанометр — миллиардная доля метра). Одна из особенностей описанного выше МОД-транзистора состоит в том, что он содержит два материала, образующих единую кристаллическую решетку. Такую структуру называют сверхрешеткой. Один из этих материалов (арсенид галлия) благодаря своим физическим свойствам действует как «потенциальная яма», захватывающая большое число электронов из другого материала (арсенида алюминия-галлия). С помощью технологии сверхрешеток, возможно, удастся создавать потенциальные ямы, расположенные вертикально и горизонтально, так что поперечное сечение кристалла будет подобно шахматной доске. Электроны, «туннелирующие» между квадратами, могут быть использованы для выполнения цифровых операций. Приборы с потенциальными ямами могут более чем в десять раз превосходить по быстро-

действию даже самые совершенные МОП-транзисторы, появления которых можно ожидать к 2000 г.

Трехмерные структуры с потенциальными ямами пока еще не созданы, но это направление кажется весьма заманчивым и технологически осуществимым в самом недалеком будущем. Если бы удалось сделать такие приборы полезными для практики, S-образная кривая, возможно, снова пошла бы круто вверх. Существующую ситуацию можно сравнить с той, которая сложилась в 50-х годах в период между изобретением транзистора и появлением интегральной схемы. Простейший прибор с потенциальной ямой — МОД-транзистор — уже изготовлен. Остается распространить эту концепцию на трехмерные структуры, создать соединения между ними и заложить их в основу новой компьютерной архитектуры. Если эти задачи будут решены, возможно, удастся преодолеть те теоретические и практические ограничения, которые по сегодняшним представлениям, стоят на пути дальнейшего совершенствования интегральных схем.



Современное программирование

Параллельные компьютеры ставят перед нами серьезную проблему: они требуют программ, которые одновременно выполняют множество действий. Как организовать «пчелиный рой» этих действий, чтобы свести их в единое целое?

ДЭВИД ГЕЛЕРНТЕР

КОМПЬЮТЕРЫ работают слишком медленно. Даже самые быстродействующие компьютеры традиционной архитектуры не могут справиться с двумястами миллионов умножений в секунду. Что уж тогда говорить о труднорешаемых задачах, например таких, как моделирование взаимодействия атомных систем? Вычисления по отношению небольшим моделям атомных систем могут длиться неделями на самых быстродействующих машинах последнего поколения. Многие другие важные задачи требуют такого же или еще большего объема вычислений. Среди них такие, как моделирование гравитационного взаимодействия небесных тел, расчет течения жидкостей и газов (очень важный для прогноза погоды), быстрый поиск в огромных базах знаний, играющих все возрастающую роль в задачах искусственного интеллекта.

В качестве временной меры можно повысить быстродействие традиционного последовательного компьютера, выполняющего команды одну за одной в своем центральном процессоре, за счет усовершенствования его элементной базы и внутренней организации. Однако по-настоящему перспективный путь — это организовать параллельную работу нескольких компьютеров, так, чтобы они, объединенные в систему, одновременно решали общую задачу. При такой организации десять идентичных компьютеров справятся с ней в лучшем случае в 10 раз быстрее, чем один компьютер, работающий в одиночку. В настоящее время уже производятся

машины, состоящие из десятков, сотен и даже тысяч отдельных процессоров, или «подкомпьютеров». Конструирование параллельного компьютера наталкивается на ряд технических проблем, многие из которых связаны с установлением путей коммуникации между процессорами (см. статью Дж. Фокса и П. Мессины «Архитектура компьютеров» на с. 16). В отличие от стратегии повышения быстродействия обычных компьютеров, которая сопровождается лишь относительно небольшими изменениями в стиле программирования, курс на параллельные вычисления ставит перед нами трудную проблему в программировании.

Для начала представим себе, что компьютерная программа является своеобразной машиной. Параллельная программа — это машина, отличающаяся от последовательной настолько же радикально, насколько параллельный компьютер отличается от последовательного. Конечно, в некотором смысле любая программа — это просто документ, набор инструкций, которые должен выполнить компьютер и которые записаны на языке, понятном как программисту, так и машине. Однако, когда инструкции уже выполняются, программа становится событием, процессом, преобразующим исходные данные в результаты. Если рассматривать программу как машину, то можно охватить оба ее аспекта: текст программы — это машина до того, как ее включить, а программа как событие — это машина в работе.

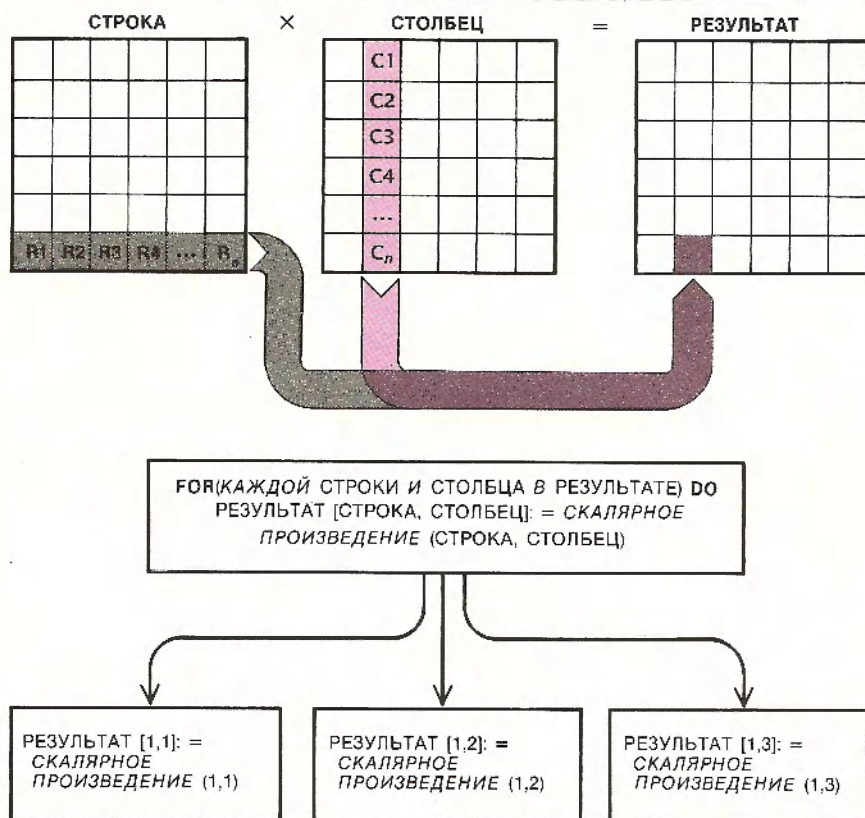
Все то, что может сделать програм-

ма, может сделать и «механическая» вычислительная машина, построенная из шестеренок и пружинок. Но машину в виде программы построить, конечно, проще. Ее строят на терминале компьютера с помощью того или иного языка программирования. Но если программа уже сама по себе является машиной, то какая роль отводится компьютеру, физическому вычислительному устройству, на котором эта программа выполняется? Компьютер становится не более чем своеобразным источником питания для программной машины. Построенная таким образом программа может выполняться на самых разнообразных вычислительных устройствах, и ее свойства почти никак не зависят от деталей этого физического вычислителя, в котором она находится в данный момент времени.

Поэтому обсуждать вопросы параллельных вычислений мы можем только на программном уровне, учитывая свойства физической машины лишь при некоторых особых обстоятельствах, когда характеристики программного и аппаратного обеспечения становятся взаимозависимыми. Обычная программа выполняет действия последовательно, одно за другим, в то время как параллельная программа должна создавать и координировать одновременно много процессов. Она должна разбить задачу на множество подзадач и координировать их решение, организуя необходимые потоки инструкций, данных и результатов.

Чтобы построить программную машину нового типа, мы должны располагать принципиально новым набором инструментов и деталей, или новым языком программирования. В традиционных языках отсутствует словарь и синтаксис, необходимые для описания параллельных процессов. Пользуясь этими языками, программист может, условно говоря, написать: «Сделать *A*, затем *B*, а затем

ПЧЕЛЫ ВЫПОЛНЯЮТ ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПРОГРАММУ, работая в улье. Подобно пчелам, способным выполнять значительные объемы работ только благодаря умению согласовывать свои действия, параллельная программа может обладать большой вычислительной мощностью благодаря такой ее организации, которая обеспечивает одновременное выполнение нескольких процессов, подчиненных единой цели. Пчелы координируют свою деятельность посредством визуальных и химических сигналов; точно так же в параллельном режиме выполнение отдельных процессов сопровождается взаимным обменом данными.



ПЕРЕМНОЖЕНИЕ ДВУХ МАТРИЦ — типичный пример задачи, обычная программа решения которой может быть автоматически преобразована в параллельную форму. Каждый элемент результирующей матрицы является скалярным произведением строки одной матрицы на столбец другой. Оно подсчитывается путем умножения каждого элемента строки одной матрицы на соответствующий элемент столбца другой матрицы и последующего суммирования этих произведений (вверху). В основе обычной программы перемножения матриц лежит подпрограмма подсчета скалярного произведения путем попарных перемножений, вложенных в цикл, который последовательно вычисляет скалярные произведения (в середине). Поскольку каждое скалярное произведение может быть вычислено независимо от других, распараллеливающий компилятор автоматически преобразует цикл в «массив» одновременно выполняющихся действий (внизу).

С», но не может написать: «Сделать A , B и C одновременно». Однако практическая потребность в новом языке — это лишь поверхностное проявление более глубокой проблемы. Новый язык программирования не возникнет сам по себе, не имея под собой новой почвы. Он лишь отражает ту или иную модель *программного обеспечения*, тот или иной подход к построению программы. Таким образом, основным становится вопрос: Что должна собой представлять параллельная программа? Анализируя различные направления проводимых в настоящее время исследований, можно, на мой взгляд, выделить три основных ответа на поставленный вопрос.

ПЕРВОЕ направление полностью обходит вопрос о том, какой должна быть параллельная программа. Вместо того чтобы предлагать

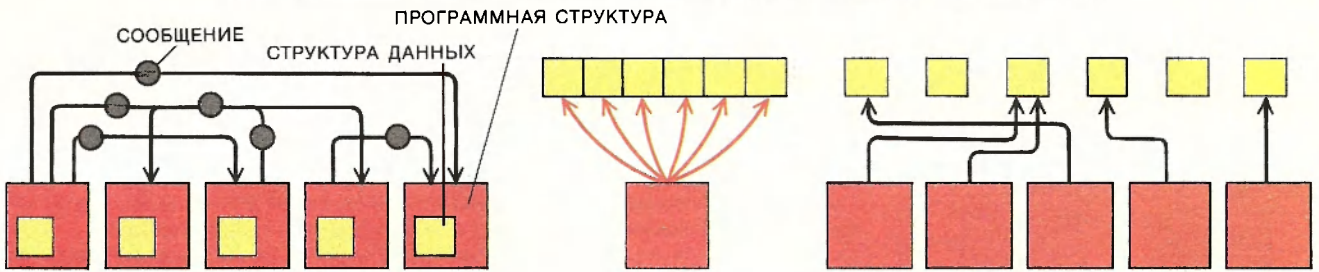
новые модели программирования, оно опирается на автоматическое преобразование обычных программ в параллельную форму. Один из подходов этого направления имеет целью создать условия, при которых одна и та же программа могла бы выполняться на параллельных компьютерах различного типа. Вообще говоря, машина не может понять языка программирования непосредственно, без специальных вспомогательных программ. На языке «высокого уровня», таком, например, как Фортран или Паскаль, инструкция присвоения переменной значения, полученного перемножением двух чисел, требует всего лишь одной строчки, однако в этой инструкции содержится несколько машинных операций, сколько именно — зависит от конструкции компьютера. Поэтому инструкция языка высокого уровня должна быть переведена на примитивный цифро-

вой язык машины и представлена последовательностью команд, записанных в машинных кодах. Обычно эту работу по переводу выполняет служебная программа, называемая компилятором.

Пытаясь главным образом решить знаменитую проблему «пыльной колоды», т. е. сохранить колоссальные материальные и временные затраты, вложенные в уже существующие программы («пыльная колода» — это стопы многочисленных перфокарт, на которых записаны старые программы), сотрудники Иллинойского университета, Университета Райса, фирмы Multiflow Computer, Inc., фирмы IBM, а также ряда других организаций занялись разработкой компиляторов, которые автоматически переводят последовательные программы в параллельный машинный код. Распараллеливающий компилятор отыскивает параллельные свойства, скрытые в последовательной программе, выявляя в ее тексте операции, которые можно выполнить одновременно, хотя в программе и указана последовательность их выполнения по одной. Затем такой компилятор генерирует машинные команды, отражающие ту неявную параллельность, которую ему удалось обнаружить в исходной программе.

Например, в основе многих программ лежит цикл вычислений, в котором одна и та же операция (или ряд операций) производится для каждого значения последовательности величин. Распараллеливающий компилятор, проанализировав цикл, может во многих случаях установить, действительно ли операции должны проводиться последовательно, как это предписано в программе. Если каждое новое вычисление зависит от значений, полученных на предыдущем шаге цикла, то последовательность действий должна сохраняться. В противном случае компилятор сможет преобразовать цикл в параллельные машинные команды, которые компьютер будет выполнять одновременно.

Рассмотрим программу перемножения двух матриц — одну из основных процедур вычислительной математики. Каждый элемент результирующей матрицы представляет собой скалярное произведение строки первой матрицы на столбец второй: чтобы получить элемент строки i , столбца j результирующей матрицы, мы умножаем каждый элемент строки i первой матрицы на соответствующий элемент столбца j второй матрицы — первый элемент на первый, второй на второй и т. д., а затем сум-



СПОСОБЫ КОММУНИКАЦИИ у различных моделей параллельных программ не одинаковы. Модель с передачей сообщений строится из многих подпрограмм (слева), каждая со своими структурами данных (массивы, списки и другие структуры, которые преобразуются активными программными структурами). Подпрограммы не имеют доступа к данным других подпрограмм, они могут общаться, только посылая друг другу сообщения. При другом подходе, применяемом в программах для компьютера типа коммутаци-

онной машины, сразу много идентичных программных структур выполняют одну и ту же команду, отдаваемую программой «хозяином». При этом преобразуется много компонентов структуры данных (в середине). Еще один подход, родственник предыдущему, позволяет производить одновременные операции над одной и той же структурой данных с помощью несинхронизированных программных структур (справа).

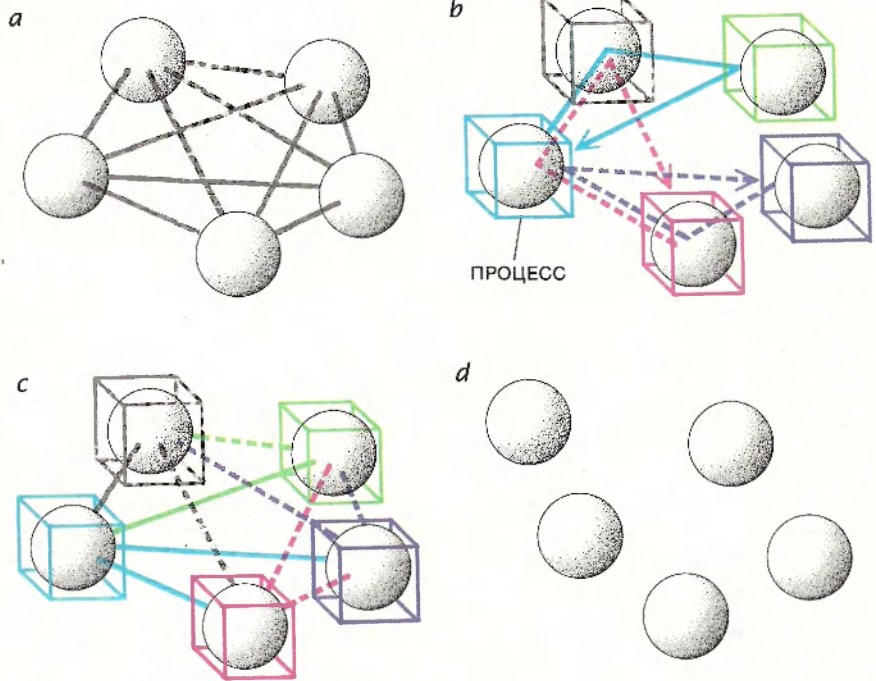
мируем полученные произведения. Обычная программа для перемножения матриц может состоять из двух циклов, вложенных один в другой, — внутренний цикл состоит из попарных умножений, а во внешнем цикле вычисляются последовательные скалярные произведения. На каждом шаге внешнего цикла выбираются строка и столбец и суммируются произведения, полученные во внутреннем цикле.

Поскольку шаги цикла логически автономны, т. е. независимы друг от друга, распараллеливающий компилятор может преобразовать этот цикл в параллельно выполняющиеся команды. Если мы умножаем, скажем, две квадратные матрицы размером 500×500 , то, распараллелив внешний цикл и выполняя все умножения для скалярных произведений одновременно, мы сможем ускорить вычисление в лучшем случае в 250 000 раз. («В лучшем случае» — это при условии, что мы располагаем компьютером, состоящим из 250 000 индивидуальных процессоров. Пока универсальной машины таких размеров еще не существует. Поэтому относительно меньшее число процессоров на существующих параллельных машинах накладывает ограничение сверху на коэффициент увеличения быстродействия при параллельных вычислениях, так как каждый процессор должен выполнять несколько потенциально параллельных шагов последовательно.)

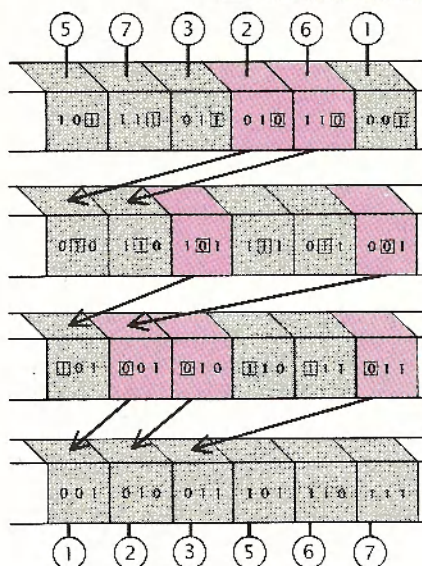
Компьютеры, ориентированные на поток данных, дают еще один способ воспользоваться неявной параллельностью программы. Как правило, машины этого типа не нацелены на решение проблемы «пыльной колоды», поскольку они были задуманы вместе с новым стилем программирования. И все же они были призваны решить

все тот же принципиальный вопрос, каким образом избежать моделей программирования с явным заданием параллельности операций. В программе, написанной для машины, ориентированной на поток данных, последовательность выполнения операций не указана явным образом. На последовательность вычислений влияют лишь те ограничения, которые вытекают естественным образом из логической структуры программы.

Любые две инструкции могут быть выполнены двумя различными процессорами одновременно, если только одна из них не требует значения, в вычислении которого непосредственно или косвенно участвует другая. В этом случае выполнение инструкции откладывается до того момента, когда поступит необходимый элемент данных. Данные как бы текут от инструкции к инструкции по мере выполнения программы.



ПРОГРАММА С ПЕРЕДАЧЕЙ СООБЩЕНИЙ рассчитывает движение нескольких тел под влиянием взаимного гравитационного воздействия (а). За каждым объектом «следит» свой процесс. В каждом вычислительном цикле каждый процесс рассылает сообщения о положении его объекта половине других процессов и получает аналогичные сообщения от остальных процессов (б). Получив сообщение, каждый процесс вычисляет силу взаимодействия своего объекта с объектом, приславшим сообщение. Таким образом каждый процесс узнает о половине сил, действующих на его объект по принятым сообщениям (с). Затем процесс корректирует положение своего объекта (д).



ПРОГРАММА для коммутационной машины сортирует последовательность чисел; на каждое число отводится свой процессор. Все процессоры одновременно проверяют последний разряд (самый младший бит) двоичного представления числа. Числа, имеющие нуль в этом разряде, продвигаются вперед в последовательности: они перераспределяются в памяти машины. Процедура повторяется для каждого разряда, числа с одним и тем же значением разряда сохраняют свое относительное расположение. После числа шагов, равного числу разрядов в наибольшем числе, последовательность получается отсортированной, причем наименьшее число в ней будет первым.

Таким образом, можно сказать (в некотором смысле), что компьютер, а не программа, создает параллельные ветви вычислений. Языки, обычно применяемые для программирования машин, ориентированных на потоки данных, или «функциональные языки», помогают машине разложить программу на параллельные процессы. Эти языки упрощают взаимоотношения между данными, участвующими в различных инструкциях, позволяя программисту устанавливать значение переменной только один раз. После того как значение переменной было установлено, она может использоваться в других частях программы, свободно и одновременно, при этом не нужно беспокоиться о том, будет ли изменено ее значение, и если будет, то когда.

Разработки, ведущиеся в настоящее время (в Массачусетском технологическом институте, Манчестерском университете и Университете штата Юта, а также в некоторых других организациях) по машинам, ориентированным на поток данных, и функцио-

нальным языкам программирования, должны вскоре пролить свет на практические перспективы этого автоматического подхода к распараллеливанию. Следует также заметить, что функциональные языки в принципе не обязательно должны привязываться к машинам, ориентированным на поток данных. Некоторые исследователи полагают, что их простота и близость к чисто математическим моделям программирования привлекают интерес к ним самим по себе независимо от параллельных вычислений. Другие (например, Пол Худак из Йельского университета) пользуются ими как совершенной и изящной основой для языков с явно выраженной параллельностью. К этой теме мы сейчас и перейдем.

ЕСЛИ параллельность действий можно выявить автоматически, то, казалось бы, чего еще нам не хватает? Зачем трудиться над созданием новых программных моделей с явно выраженными свойствами параллельности? Дело в том, что средства автоматического преобразования из последовательной формы в параллельную работают хорошо только для некоторых видов программ. Распараллеливающий компилятор, например, переводит последовательную программу в параллельные машинные команды, основываясь на ожидаемом поведении программы. Действительно, многие программы, в особенности расчетного характера, разворачиваются предсказуемым образом, и компилятор может вполне надежно установить, какие части задачи могут быть решены параллельным образом. Однако некоторые другие программы имеют очень сложную или даже непредсказуемую последовательность выполнения, и здесь уже труднее выявить неявную параллельность операций. К этой категории программ относятся, по видимому, многие программы, решающие задачи искусственного интеллекта.

Автоматическим преобразованиям присущ и более существенный недостаток: они могут выявить параллельность, скрытую в существующем алгоритме (процедуре, следуя которой программа решает задачу), но не могут изобрести новых, параллельных в своей основе алгоритмов. Программисты, располагающие параллельными средствами, изобретают иногда совершенно новые пути решения задач. Но, чтобы воплотить свои изобретения в работающие программы, им нужны языки, позволяющие выражать параллельность действий, т. е. языки, основанные на парал-

лельных программных моделях.

Таким образом, второй и третий ответы на мой исходный вопрос заключаются в двух широких подходах к явно выраженной параллельности. Различаются они механизмами, устанавливаемыми для коммуникаций между различными параллельно выполняющимися процессами.

При первом подходе мы имеем набор параллельных процессов, каждый из которых подобен самостоятельной обычной программе. Каждый такой процесс, или подпрограмма, состоит из программных структур и структур данных (например, массивов и списков) точно так же, как и обычная программа. Программные структуры активны: в них выполняются инструкции, преобразующие пассивные структуры данных. (Алгоритм решения задачи воплощен одновременно и в программных структурах, и в структурах данных.)

Процессам, совместно решающим задачу, обычно нужно иметь доступ к общим для них данным. Но в рамках такой модели структуры данных как бы встроены, каждая в своем процессе, поэтому процессы не имеют прямого доступа к данным, принадлежащим другим процессам. Вместо этого они обмениваются сообщениями. Когда один процесс готов передать данные другому, он генерирует сообщение и передает его специальному служебному процессу — программе, рассылающей сообщения. Последняя направляет сообщение адресату. Такая схема несколько усложняет программу в целом, поскольку каждый процесс должен уметь генерировать сообщения и знать, куда их посылать. Однако при таком подходе решается трудная проблема координирования сообщений между процессами.

Допустим, что процессы могли бы непосредственно обращаться ко внутренним структурам данных других процессов. Но в этом случае не исключалась бы возможность прочтения несостоятельных или неполных данных, находящихся еще в стадии подготовки и не пригодных для использования другими процессами. Потребовав, чтобы все коммуникации имели форму сообщений, мы решаем проблему координации — сообщаем генерируются только тогда, когда подготовлены полные и согласованные данные.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ сложность большинства схем передачи сообщений говорит о том, что эти схемы лучше всего подходят к задачам, разбивающимся на относительно большие в значительной мере независимые блоки, коммуникационные по-

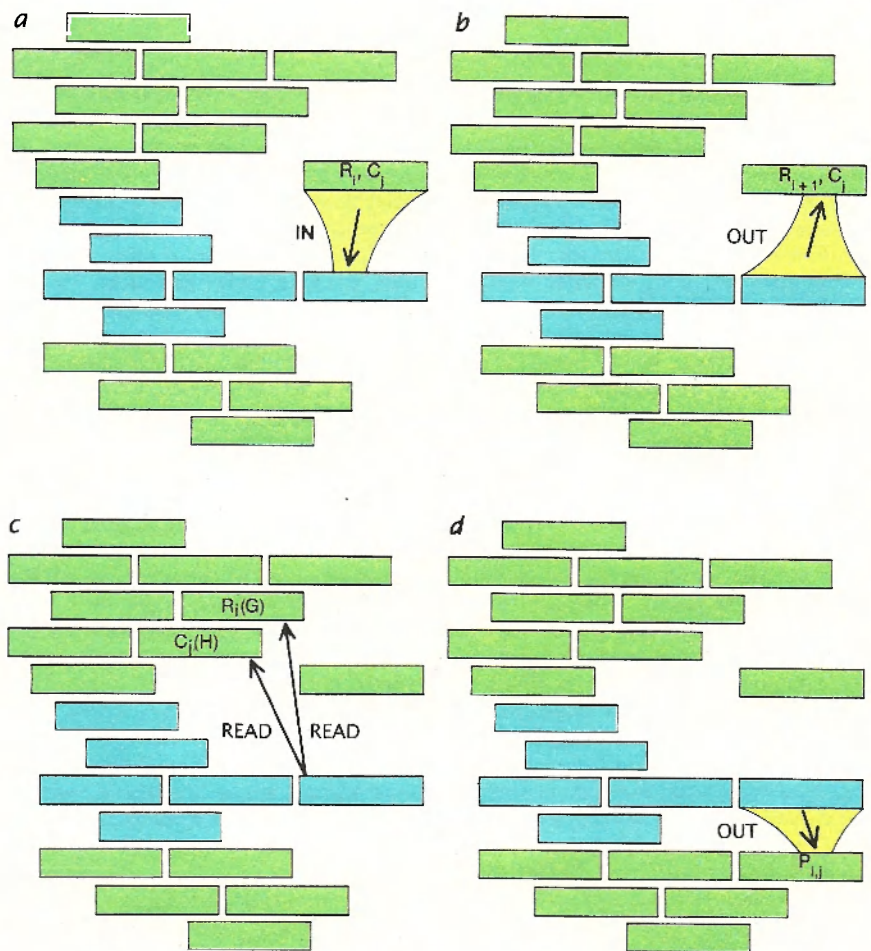
требности которых могут быть удовлетворены простым и регулярным обменом сообщениями. Рассмотрим, например, задачу моделирования n движущихся объектов, каждый из которых оказывает гравитационное воздействие на все остальные. Задача формулируется просто, но она требует большого объема вычислений. На традиционных компьютерах моделирование больших систем разворачивается медленно. Хороший способ ускорить вычисления заключается в том, чтобы рассчитывать силы, действующие на все n объектов одновременно, затем корректировать их положение с учетом действия этих сил и вновь повторять цикл вычислений.

Рассмотрим способ решения этой задачи с использованием передачи сообщений, описанный Ч. Зейтцем из Калифорнийского технологического института. В модели создается n процессов, по одному на каждый объект. На каждом шаге вычислительного цикла каждый процесс рассылает сообщения о текущих координатах своего объекта половине остальных процессов и принимает аналогичные сообщения от другой их половины. Допустим сообщение от P_j (процесса, соответствующего j -му объекту) вначале достигает процесса P_k (соответствующего k -му объекту). Последний вычисляет текущее значение силы взаимодействия между объектами k и j , добавляет эту информацию к сообщению и пересылает его P_j . В конце концов сообщение возвращается к P_j , неся в себе информацию о силах, действующих между j и половиной других объектов системы. Аналогичные сообщения от остальных объектов достигли тем временем P_j , передав ему информацию, с помощью которой он может рассчитать остальные силы, действующие на объект j . Теперь процесс P_j может подсчитать суммарное влияние всех этих сил на положение объекта j .

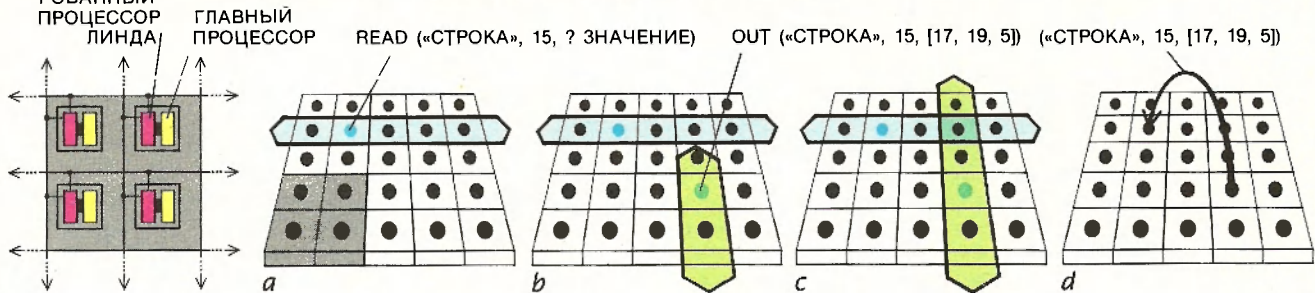
Довольно значительная работа, совершаемая каждым из этих процессов, означает, что такой алгоритм решения задачи взаимодействия n тел, как и большинство программ с передачей сообщений, лучше всего подходит для машины со сравнительно крупными компонентами, так сказать «крупнозернистой машины», обладающей мощными процессорами, количество которых невелико по сравнению с «мелкозернистой» машиной. Исключение из этого «крупнозернистого» правила представляет так называемое систолическое программирование — некая крайняя разновидность подхода, использующего передачу сообщений. Программа подобного рода вообще не заботится о

специальном процессе, предназначенном для передачи сообщений, она выполняется на машине, аппаратура которой настроена на ту систему коммуникаций, которой требует данный алгоритм. Геометрия машины имитирует геометрию программы. Данные прокачиваются ритмически (отсюда термин «систолический») по фиксированной сети коммуникаций. Фиксированная геометрия коммуникаций означает, что систолические компьютеры обычно являются «мелкозернистыми» машинами и что они лучше всего подходят для решения ограниченного класса задач, а именно только тех, которые распадаются на большое число простых составляющих.

В ПРОГРАММАХ, использующих передачу сообщений, каждая структура данных как бы запечатана внутри того или иного процесса. В широкой и разнообразной группе других подходов к параллельному программированию к одной и той же структуре данных имеют доступ многие процессы. В рамках одного из таких подходов элементы большой структуры данных могут изменяться одновременно цепочкой идентичных процессов, управляемых одним процессом «хозяином». В другом случае устанавливаются специальные правила, следуя которым много процессов могут иметь доступ к общим данным по своей собственной инициативе.



ПРОГРАММА В ПРОСТРАНСТВЕ КОРТЕЖЕЙ для перемножения матриц распределяет данные (содержимое перемножаемых матриц G и H) между объектами, называемыми пассивными кортежами (зеленый) и распределяет работу по вычислению скалярных произведений между активными кортежами (синий). Чтобы установить, какое из скалярных произведений должно подсчитываться следующим, активный кортеж поглощает тот пассивный кортеж, который указывает на строку и столбец, подлежащий перемножению (a). Он модифицирует данные для следующего активного кортежа, ищущего себе работу, и вновь создает пассивный кортеж (b). Затем он отыскивает и читает кортежи, содержащие строку R_i и столбец C_j (c). Вычислив скалярное произведение $P_{i,j}$, активный кортеж генерирует новый пассивный кортеж, хранящий результат (d). (Другие активные кортежи вычисляют тем временем другие скалярные произведения.) IN, OUT, READ — операции языка Линда, разработанного автором статьи и его коллегами.



СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВА КОРТЕЖЕЙ, в котором любой активный кортеж может получить доступ к любому пассивному кортежу, — довольно трудная задача, если пользоваться параллельным компьютером, память которого распределена между процессорами. В машине Линда, параллельном компьютере, разрабатываемом фирмой AT&T Bell Laboratories специально для языка пространства кортежей Линда, память распределена между многочисленными узлами, или подкомпьютерами, соединенными между собой в решетку (слева). Чтобы прочесть пассивный кор-

теж, содержащий, скажем, строку величин и обозначенный как «строка 15», активный кортеж выдает запрос на чтение READ, сопровождаемый частичным описанием пассивного кортежа, всем другим узлам в той же строке решетки (а). Другое вычисление может сгенерировать новый кортеж, и когда последний появляется на каком-нибудь узле, этот узел проектирует свой собственный сигнал вдоль своего столбца в решетке (b). Узел, в котором пересекаются запрос READ и сигнал от пассивного кортежа (c), направляет затем соответствующие данные (d).

Первый из этих подходов относится к специальной аппаратуре, он нашел отражение в нескольких языках программирования, предназначенных для параллельного компьютера, получившего название коммутационной машины (см.: У.Д. Хиллис. Коммутационная машина, «В мире науки», 1987, № 8). Коммутационная машина — это «мелкозернистая» машина, о которой можно также сказать, что она является «активной памятью». Память машины разбита (в наиболее крупной из существующих пока моделей) приблизительно на 65 тыс. сравнительно мелких компонентов, каждый из которых управляется своим собственным простым процессором. Программы, написанные для коммутационной машины, соответствуют этой структуре, они основаны на структурах данных, которые распределены по активной памяти, по одному элементу данных на каждый процессор. Такие структуры как бы преобразуют сами себя по мере того, как каждый процессор выполняет одни и те же инструкции в синхронизированном режиме. Программа, скажем, может умножить сразу 10 000 величин на 3, просто поместив каждую величину в своем отдельном элементе активной памяти и выполнив инструкцию «всем умножить свое содержимое на 3».

До удивления много различных процедур хорошо работают в подобной среде. Яркий пример тому — сортировка чисел, часто встречающаяся процедура как на практике, так и в теории. Одна из программ сортировки, написанных для коммутационной машины, основана на алгоритме так называемой поразрядной сортировки. В версии коммутационной машины (произошедшей от соответствующей

последовательной версии) неотсортированные числа распределяются по одному на каждый процессор или по одному на каждый активный элемент памяти. Все процессоры одновременно проверяют самый младший бит цепочки нулей и единиц, представляющей число в двоичном виде. Числа, имеющие 0 в данном разряде, продвигаются вперед в последовательности, числа, имеющие 1, отодвигаются назад. (Число может непосредственно перепрыгнуть из любого элемента активной памяти в любой другой.) Относительные позиции чисел с одним и тем же битом сохраняются во время этих перемещений. Процедура повторяется далее для следующего бита, и после некоторого количества итераций, равного числу разрядов в наибольшем числе, мы получаем упорядоченную последовательность, в которой наименьшее число будет первым по порядку. Вплоть до физического ограничения, накладываемого 65 тыс. процессоров машины, процедура выполняется одинаково быстро вне зависимости от количества сортируемых чисел.

КОММУТАЦИОННАЯ машина позволяет производить много различных действий над одной и той же структурой данных в одно и то же время, и все эти действия координируются одним главным процессором, который дирижирует хором послушных исполнителей. В рамках другого подхода, использующего общие структуры данных, проблема координации решается при помощи «блуждающих» процессоров, временно захватывающих монополию на доступ к порции обрабатываемых ими данных и не позволяющих, таким образом, другим процессам воздействовать на эти дан-

ные в то же самое время. В отличие от аккуратно упорядоченного стиля программирования, требуемого коммутационной машиной, этот второй подход приспособлен к более свободно организованным, неоднородным задачам. Более того, он основан не на каком-то специфическом типе машины, а на концепции, совершенно не связанной с аппаратурой и называемой пространством кортежей. Этот последний подход воплощен в языке Линда, который был разработан Николасом Карриеро, мною и другими членами нашей рабочей группы в Йельском университете.

Пространство кортежей можно представить себе в виде бесформенного мешка, заполненного взаимодействующими объектами, называемыми кортежами (под кортежем мы понимаем просто упорядоченное множество элементов). Существуют два типа кортежей. Активные кортежи могли бы играть роль процессов в модели, основанной на передаче сообщений, — они выполняют вычислительную работу. Общаясь между собой, активные кортежи генерируют, читают и поглощают пассивные кортежи. Однако в отличие от сообщений в первой модели пассивные кортежи являются неотъемлемыми частями программ в пространстве кортежей, они содержат ее общие структуры данных.

Пассивные кортежи возникают и исчезают по мере выполнения программы, подобно листочкам, прикрепляемым к доске объявлений, чтобы затем быть снятыми и уступить место другим объявлениям. Активные кортежи, которым нужны данные, либо читают пассивные кортежи, либо поглощают их. По мере того как активные кортежи получают

результаты, они генерируют новые пассивные кортежи (или прикрепляют новые объявления). Активный кортеж, завершивший свои вычисления, сам в свою очередь становится пассивным кортежем, хранящим окончательный результат вычисления. В рамках языка Линда параллельная программа, таким образом, представляет собой целый рой одновременно работающих активных кортежей, окруженных облачком пассивных кортежей, в котором они в конце концов и сами растворяются.

Программа умножения матриц на языке Линда могла бы хранить строки одной и столбцы другой матрицы в пассивных кортежах, по одной строке или столбцу в кортеже. Активные кортежи раз за разом читают строку, затем столбец, подсчитывают их скалярное произведение и выбрасывают результат в виде очередного пассивного кортежа. Чем более многочисленны активные кортежи, тем быстрее работает программа (вплоть до ограничения, накладываемого возможностями аппаратных средств и размерами задачи). Другое возможное решение можно построить, воспользовавшись тем фактом, что активные кортежи превращаются в пассивные, когда они завершают свои вычисления. Программа могла бы представить матрицу — результат в виде ряда активных кортежей, каждый из которых отвечает за расчет одного скалярного произведения. Активные кортежи одновременно вычислят каждый свое скалярное произведение и превратятся в результат.

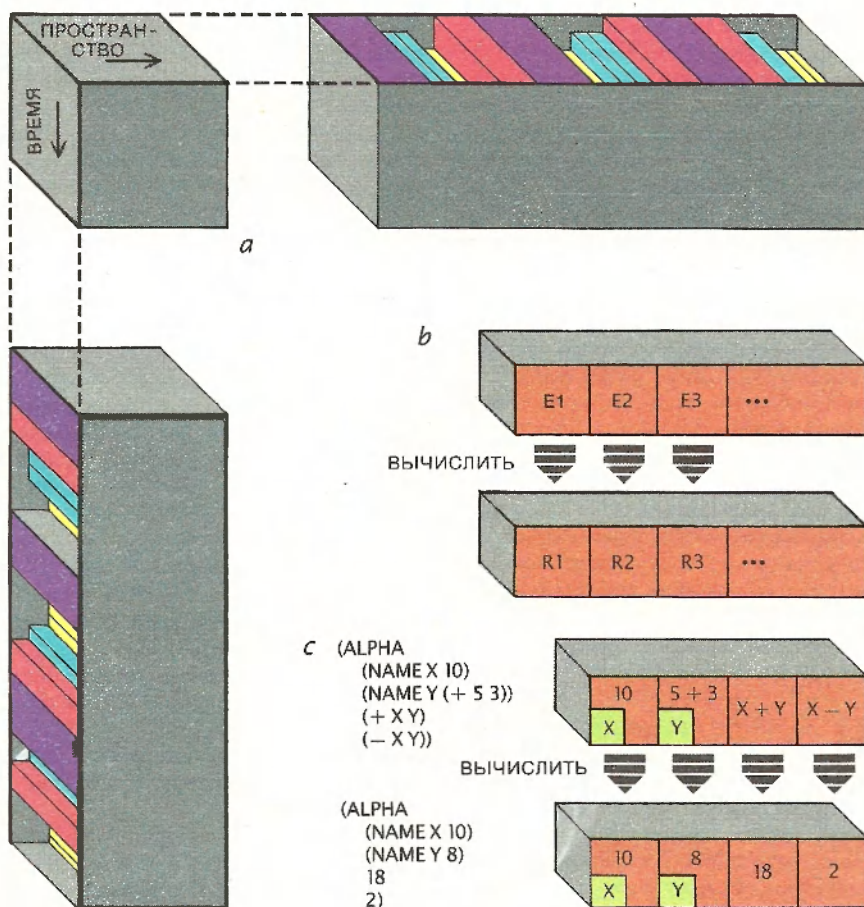
Поскольку в пространстве кортежей задачу можно легко разбивать на части по ходу ее решения и менять форму программы по ходу ее выполнения, эта концепция может послужить обещающей основой для представления сложных и быстро эволюционирующих систем в микромире. Рассмотрим, например, исключительно в целях иллюстрации к сказанному параллельную программу, поддерживающую в реальном масштабе времени модель текущего состояния воздушного транспорта США. Всякий раз, когда взлетает самолет, создается пассивный кортеж, хранящий постоянно модифицируемую информацию, которая отражает все знания и предположения системы относительно состояния данного самолета. Данные о погодных условиях, о состоянии аэродромов и т. п. содержатся в других пассивных кортежах.

Активные кортежи программы, работая параллельно, следят за изменяющейся картиной и вырабатывают рекомендации по управлению воздушным транспортом. Очень важна

способность системы в нужный момент фокусировать свое внимание на нужных объектах. Когда какой-нибудь сектор оказывается особенно сильно загруженным, множество активных кортежей собираются вокруг него, чтобы помочь выйти из затруднения. Когда движение не интенсивно, активные кортежи могут переключить свое внимание на фоновые задачи — просматривая пассивные кортежи, которые уже «приземлились», например, для подготовки статистической отчетности. Пока еще не существует такой крупной программы на языке Линда, однако более простые программы этого типа уже разрабатываются.

Интересно, каким образом такое,

можно сказать, текучее программное обеспечение может обитать в жестко фиксированной аппаратуре физического компьютера? В параллельных машинах, все процессоры которых физически связаны с общей памятью, кортежи хранятся в этой памяти. Активные кортежи закреплены за процессорами, что позволяет им находиться в активном состоянии, и каждый активный кортеж имеет доступ ко всем пассивным. Создание пространства кортежей на машине с «распределенной памятью» — памятью, поделенной между процессорами при отсутствии общих областей, — задача куда более трудная. Тем не менее системы, построенные на пространстве кортежей, уже реа-



СИММЕТРИЧНЫЙ ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ распознает свойства симметрии в структуре вычислений (а). Программа выполняется в течение определенного периода времени и занимает определенную часть «пространства» в компьютере. Традиционные программы рассматривают вычисление как последовательность шагов во времени, в которой относительно мелкие шаги вложены в шаги большего масштаба. Однако само вычисление обладает весьма сходными свойствами, если рассматривать его под «пространственным углом зрения» как набор одновременно существующих объектов (это могут быть модули, структуры данных или определения процедур). Программа на симметричном языке (b) рассматривает вычисления как карту объектов, которые могут быть простыми, как число или описание переменной, или же сложными, как большая подпрограмма. При выполнении программы все элементы (E) обрабатываются параллельно. Появляется новая карта результатов (R). Простая программа на симметричном Лиспе (c) определяет последовательность объектов, которые преобразуются в ходе выполнения программы.

лизованы и на некоторых машинах этого типа, а в настоящее время группой сотрудников фирмы AT&T Bell Laboratories под руководством С.Р. Эхьюа разрабатывается новая машина с распределенной памятью, специально предназначенная для языка Линда.

Каждая из конкурирующих программных моделей имеет свои сильные стороны. Распараллеливающие компиляторы хорошо работают, по-видимому, лишь для узких классов программ, но поскольку последние играют важную роль в расчетных задачах, такие компиляторы сохраняют свое значение и в будущем. Модель с использованием обмена сообщениями хороша в тех случаях, когда программа может быть естественным образом разложена на логические сети отдельных и в значительной мере независимых частей. Однако противники этой модели утверждают, что она навязывает неудобный и неестественный стиль программирования. Так же как и модель с передачей сообщений (а может быть, и в большей степени), Линда проявляет терпимость по отношению к несинхронизированным, разнородным программным структурам и привносит естественность в стиль работы с общими структурами данных, однако практический опыт работы с системой Линда еще недостаточен, чтобы доказать эффективность этого подхода в широких сферах приложений. Хотя модель коммутационной машины требует синхронизации и в известной мере однородности, немногие другие программные модели могут соперничать с ней в способности максимально воспользоваться очень многочисленными «мелкозернистыми» параллельными ветвями вычислений.

ВТО ВРЕМЯ как продолжают исследования и разработки в области программных моделей, ученые, интересующиеся параллельными вычислениями, задаются фундаментальными вопросами, касающимися самой природы программ. Параллельность, о которой мы говорили до сих пор, находится где-то на периферии по отношению к центральным вопросам теории вычислений. Это, скорее, некая практически необходимая мера, применяемая, когда большой неповоротливой программе нужно «дать пинка», вместо того чтобы снабдить ее фундаментальным инструментом мышления. Однако можно взглянуть на все это и с другой точки зрения. Если забраться высоко-высоко и посмотреть на вычисления вниз, так сказать, под прямым углом, то мы увидим, что параллелизм определен-

ного рода присущ всему программированию как таковому.

В каком-то смысле невозможно вообще представить себе вычисление, не являющееся в основе своей параллельным. Попробуем провести аналогию с рецептом для шоколадного торта. Компьютерные программы часто уподобляют рецептам: и те и другие предназначены для преобразования того, что на входе, в то, что на выходе. Форма рецептов обычно строго последовательная. Рецепт приготовления пирожного, например, может быть выражен следующим образом: (1) взбить масло, (2) добавить муку и шоколад, (3) залить смесь в форму и запечь, (4) приготовить крем, (5) намазать испеченное пирожное кремом. Однако рецепт приготовления пирожного является неявно, хотя и в пассивном смысле, параллельным. Чтобы его предписать можно было выполнить, одновременно должны существовать: миска, миксер, форма, печь и, наконец, повар. Если у нас сначала будет миска, затем печь, а затем повар, и периоды их наличия не будут пересекающимися, то это будет ничуть не лучше, чем если мы вынуждены были бы взбивать тесто, запекать его и намазывать кремом одновременно.

В этом смысле любая программа в своей основе также является параллельной: она состоит из многих составляющих, таких, как определение функций, структуры данных, выполняемые операторы. Все эти компоненты должны существовать одновременно, т. е. параллельно, как необходимое условие для выполнения программы. Куда ведет нас это наблюдение? В одном весьма важном смысле вычисления выглядят точно так же с этой новой точки зрения, как они выглядели с точки зрения традиционной. Другими словами, в структуре вычислений мы, по-видимому, наблюдаем некое фундаментальное свойство симметрии.

Эта симметрия сводится к следующему. С традиционной точки зрения большинство вычислительных процедур состоит из некоторой последовательности шагов, каждый из этих шагов определен посредством другой последовательности шагов, также в свою очередь состоящих из последовательностей шагов и т. д. Если мы будем рассматривать структуру вычислительного процесса в самом крупном масштабе, то каждый отдельный шаг может представлять собой довольно сложную подпрограмму. Эти подпрограммы могут распадаться на более простые процедуры, содержащие последовательности операторов высокого уровня, а послед-

ние растворяются в конце концов в элементарных машинных командах. Если рассматривать такую структуру, находясь на «последовательной точке зрения», то она до определенной степени подобна самой себе при разных масштабах наблюдения, как контур береговой линии. Крупные структуры растворяются в более мелких, последние — в еще более мелких и т. д.

Если же смотреть на программы с симметричной, «параллельной точки зрения», то мы будем наблюдать весьма сходную картину. В крупном масштабе они часто распадаются на программные файлы, или модули, которые, как правило, содержат определения функций и структуры данных, на более низком уровне мы опять встречаем определения процедур и структуры данных и так далее вплоть до элементарных числовых констант, переменных и выполняемых операций (и в конце концов до отдельных слоев памяти). В традиционных языках программирования временное подобие структур самим себе позволяет программисту рассматривать шаги любого размера как равноправные так, что две сложные или две простые операции можно объединить в одну и ту же программную конструкцию, и циклы одного и того же вида могут вычислять, например, миллион операций на одном шаге цикла или всего дюжину. Однако параллельное, или «пространственное», подобие оказывается скрытым, потому что программисты вынуждены определять объекты по-разному на разных уровнях.

В языках программирования нового класса подобие структур поддерживается вдоль обеих осей, пространственной и временной. Эти «симметричные» языки, разрабатываемые нашей группой совместно с С. Джагганнатаном из МТИ, Т. Лондоном из фирмы Bell Laboratories и другими коллегами, позволяют программистам раскладывать вычисления не только во временные последовательности все более простых шагов, но также и в «параллельные» пространственные последовательности все более простых объектов. В программе, написанной на таком симметричном языке, параллельные объекты, скрытые в обычной программе, как бы раскладываются по «пространству» в памяти компьютера. Они образуют упорядоченную пространственную структуру (мы знаем, где находится каждый объект, точно так же, как мы знаем, *когда* должен выполняться каждый шаг во временной последовательности), причем новые объекты могут быть вложены —

опять-таки в упорядоченной структуре — в каждый из старых объектов. В объектах могут быть ссылки друг на друга либо по положению, либо по имени. Так, например, объект, содержащий число 3, может иметь имя x , содержимое другого объекта может быть задано в виде $x + 5$ или, скажем, как «содержимое 17-го объекта слева» + 5. Таким образом, текст программы на симметричном языке описывает содержимое каждого объекта и его положение на карте.

Когда такая программа выполняется, вычисления во всех областях пространства проводятся одновременно, а результат представляет собой новую карту, показывающую конечное состояние каждого объекта, присутствовавшего на исходной карте еще не вычисленных выражений. Процесс выполнения симметричной программы напоминает проявление фотографической пленки.

ТО, ЧЕМУ мы учимся, создавая параллельные программные машины, может в конечном итоге изменить наши представления как о самом

программировании, так и о предельных возможностях вычислений. Параллельные программы (потенциально) намного мощнее, чем старомодные последовательные. Куда это все нас приведет? Параллельные вычисления преобразуют многие сферы нашей деятельности, машинную графику и автоматизированное управление процессами в реальном масштабе времени, искусственный интеллект и многое другое. И что, наверное, важнее всего, с их помощью станет возможным моделировать и анализировать природные явления на значительно более высоком уровне по сравнению с теми попытками, которые делаются в настоящее время. М. Шульц из Йельского университета характеризует окончательную цель исследований в области параллельных вычислений как «ликвидацию экспериментальной науки». Слова Шульца, наверное, не следует понимать буквально — нам все же нужны кое-какие реальные данные для того, чтобы мы могли отлаживать свои компьютерные модели. Однако над его словами стоит задуматься.

занного с САПК, можно создать более точные ДНК-зонды для предсказания заболевания. Это в свою очередь усовершенствует диагностику и классификацию колоректального рака. «В принципе ничто не мешает обнаружить ген, который вызывает САПК и, по-видимому, связан с другими видами колоректального рака», — сказал Бодмер. Он отметил, что если удастся идентифицировать гипотетический ингибитор клеточного роста, то можно будет попытаться лечить полипоз, как-либо компенсируя его отсутствие.

Сходные данные сообщаются в «Nature» о другом редком наследственном раковом синдроме, проявляющемся в среднем возрасте — о множественных новообразованиях эндокриной системы (МНЭС) типа 2А. Две международные исследовательские группы независимо друг от друга нашли маркеры вблизи гена, находящегося на 10-й хромосоме и, по-видимому, обуславливающего это заболевание. Однако при помощи полученных ДНК-зондов исследователи недостаточно близко подобрались к гену, чтобы можно было эффективно выявлять заболевание в поражаемых семьях.

Одновременно английские исследователи обнаружили, что при МНЭС, как и при колоректальном раке, в опухлевых клетках отсутствует определенный участок ДНК. Как оказалось, в данном случае раковое место находится в 1-й хромосоме, т. е. не совпадает с местоположением гена, предположительно связанного с этим синдромом. По поводу их результатов Н. Симпсон из Королевского университета в Кингстоне (Канада, пров. Онтарио), возглавляющая одну из двух вышеупомянутых групп, которые локализовали ген, обуславливающий МНЭС, на 10-й хромосоме, сказала: «Трудно понять, как согласовать имеющиеся данные».

Все эти факты поддерживают предположение, что и другие раковые заболевания обусловлены утратой одной из копий определенного участка ДНК. Х. Юнис из Медицинской школы Миннесотского университета получил косвенные доказательства в пользу такой идеи: многие самые разные мутагены и канцерогены вызывают визуально наблюдаемые нарушения в хромосомах, например разрывы, в критических «неустойчивых» участках. Хромосомные нарушения в этих участках имеют место во многих опухолях (хотя далеко не все специалисты рассматривают такие нарушения как первопричину рака); возможно, что такое нарушение происходит вблизи гена, от которого зависит САПК.

Наука и общество

Погубленные гены

КОЛОРЕКТАЛЬНЫЙ РАК, т. е. злокачественные опухоли ободочной и прямой кишки, занимающий второе место по распространенности у жителей городов в развитых странах, начал раскрывать некоторые свои секреты под натиском генетического анализа. Это достигнуто частично благодаря работе, проделанной группой исследователей, возглавляемой У. Бодмером — директором Имперского фонда по изучению рака в Лондоне. В их статье, опубликованной в журнале «Nature», описывается, как с помощью ДНК-маркера в 5-й хромосоме человека был локализован ген, ответственный за редкое наследственное заболевание — семейный аденоматозный полипоз кишечника (САПК). При синдроме САПК обычно в юношеском возрасте в кишечнике развиваются сотни полипов, причем со временем некоторые полипы перерождаются в рак, если не удалить пораженные участки кишечника. При помощи ДНК-зонда — короткого сегмента ДНК, связывающегося с ДНК человека в маркерном участке вблизи нужного гена — в принципе можно проверять ДНК у членов семьи, подверженных САПК, и выявлять заболевание, прежде чем оно проявит себя.

Одновременно с исследованиями Бодмера и его коллег сотрудница того же учреждения Э. Соломон изучала клетки обычных колоректальных опухолей — «спорадических» опухолей, на долю которых приходится подавляющее большинство случаев рака этого отдела кишечника. Обнаружилось, что значительная доля таких опухолей — не менее 20% — характеризуется отсутствием определенного участка в одной из двух копий 5-й хромосомы, а именно участка, предположительно включающего ген, ответственный за САПК.

Как считает Бодмер, вполне разумно предполагать, что этот участок 5-й хромосомы определяет синтез некоего вещества, подавляющего клеточный рост, тем самым предотвращая возникновение полипов. Если в клетке одна из двух копий гена не функционирует — потому ли, что она утеряна из-за ошибки, произошедшей в процессе деления родительской клетки, или потому, что она исходно дефектна (как в случае САПК) — не образуется в достаточном количестве ингибитора клеточного деления, слизистая оболочка кишечника излишне разрастается и формируются полипы, что открывает дорогу раку в случае прекращения функционирования и второй копии гена. Зная приблизительное местоположение гена, свя-



Технология хранения данных

Через пять лет дисковые магнитные устройства будут записывать и считывать данные вдвое быстрее и хранить в пять раз больше информации по сравнению с сегодняшними устройствами. Магнитооптическая техника сможет обеспечить еще более высокую плотность записи

МАРК Х. КРАЙДЕР

ТО, ЧТО ДОЛИНУ Санта-Клара в Калифорнии, считающуюся центром американской электронной промышленности, чаще называют «Кремниевой долиной», болезненно воспринимают изготовители магнитных запоминающих устройств. Дело в том, что фирмы, расположенные в этой долине, в действительности получают больше прибылей от магнитных запоминающих устройств, чем от полупроводниковых приборов. Более подходящим прозвищем, по мнению этих промышленников, было бы «Долина окиси железа», поскольку это самый распространенный материал для магнитных носителей информации.

И хотя это не более чем шутка, в ней, несомненно, есть зерно истины: магнитные запоминающие устройства в виде знакомых нам накопителей на магнитной ленте и гибких магнитных дисках, а также более сложные устройства на жестких дисках играют не менее важную роль в современных вычислительных машинах, чем полупроводниковые изделия. Более мощные вычислительные системы, которые придут на смену сегодняшним, будут иметь доступ к значительно большему объему данных и обращаться к ним за более короткое время. Поэтому увеличение быстродействия компьютеров, достигаемое за счет прогресса в полупроводниковых приборах, а также в способах их соединения и программирования,

должно сопровождаться ростом емкости и производительности устройств внешней памяти.

Для хранения больших объемов информации лучше всего подходят запоминающие устройства на магнитных носителях. Они отличаются значительно большей емкостью и меньшей стоимостью хранения данных в расчете на один бит по сравнению с полупроводниковой памятью. Обычный накопитель на жестких дисках на площади 1 см² способен хранить 800 тыс. символов, или байтов (что эквивалентно приблизительно числу знаков на 400 машинописных страницах); крупные устройства с несколькими дисками способны хранить более 5 млрд. символов. Данные на диске отыскиваются за 15 тысячных долей секунды, т. е. за 15 мс, и передаются со скоростью около 3 млн. символов в секунду. Более того, поскольку диски некоторых моделей и все бобины с магнитной лентой можно легко снимать и заменять другими, не уничтожая записанных данных, то эти устройства обеспечивают практически неограниченные возможности для хранения информации.

Впечатляют не только емкостные и скоростные возможности технологии хранения данных на магнитных устройствах памяти, но и некоторые чисто технические достоинства их конструкции. Жесткий диск представляет собой исключительно гладкую пластинку, покрытую тонким слоем маг-

нитного материала (носителя информации) и вращающуюся со скоростью 3600 об/мин. Микроскопических размеров записывающая головка, буквально летящая над диском на воздушной подушке толщиной 25 миллионных долей сантиметра, сканирует его поверхность с относительной скоростью около 100 миль/ч, без малейших отклонений следуя вдоль круговой дорожки шириной около одной тысячной сантиметра. Быстро перемещаясь с одной дорожки на другую, головка подвергается ускорениям, во много раз превышающим ускорение свободного падения, и все же ей удается безошибочно находить нужную дорожку и точно устанавливаться над ней. Если бы головка «врезалась» на такой скорости в поверхность диска, то диск был бы поврежден и информация, записанная на нем, была бы уничтожена. Тем не менее подобные устройства работают безупречно на протяжении 10 лет и более.

При всем совершенстве конструкции современных устройств внешней магнитной памяти предвидится, что в будущем их емкость и быстродействие станут еще больше. Ожидается, что уже в ближайшие пять лет появятся новые магнитные носители и усовершенствованные записывающие головки, способные обеспечить пятикратное увеличение плотности записи информации. Большинство устройств будут, как и прежде, записывать и считывать данные посредством электромагнитных головок, подобных головкам бытовых магнитофонов, однако значительную долю рынка завоюют, по-видимому, устройства внешней памяти, использующие лазеры для чтения, записи и стирания информации на носителях в виде тонких магнитных пленок. Методы магнитооптической записи смогут обеспечить еще более высокую плотность хранения данных и, судя по все-

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ГОЛОВКИ ДВУХ ТИПОВ объединены в одном микроскопическом приборе, созданном фирмами IBM и Control Data. Коричневая витая структура, подобно обмотке традиционной индукционной головки, проводит ток, создающий магнитный поток в зазоре головки, с помощью которого данные записываются на носитель. Считываются данные расположенной ниже магниторезистивной головкой, детектирующей изменение магнитного поля как изменение своего сопротивления. Подобная головка чувствительна к полям, вплотную прилегающим к дорожке данных. Поскольку считывающий элемент уже дорожки, он менее чувствителен к помехам, создаваемым соседними дорожками.

му, потеснят традиционные магнитные запоминающие устройства во многих сферах применения.

НЕЗАВИСИМО от того, говорим ли мы о магнитных лентах или дисках, запоминание двоичных дан-

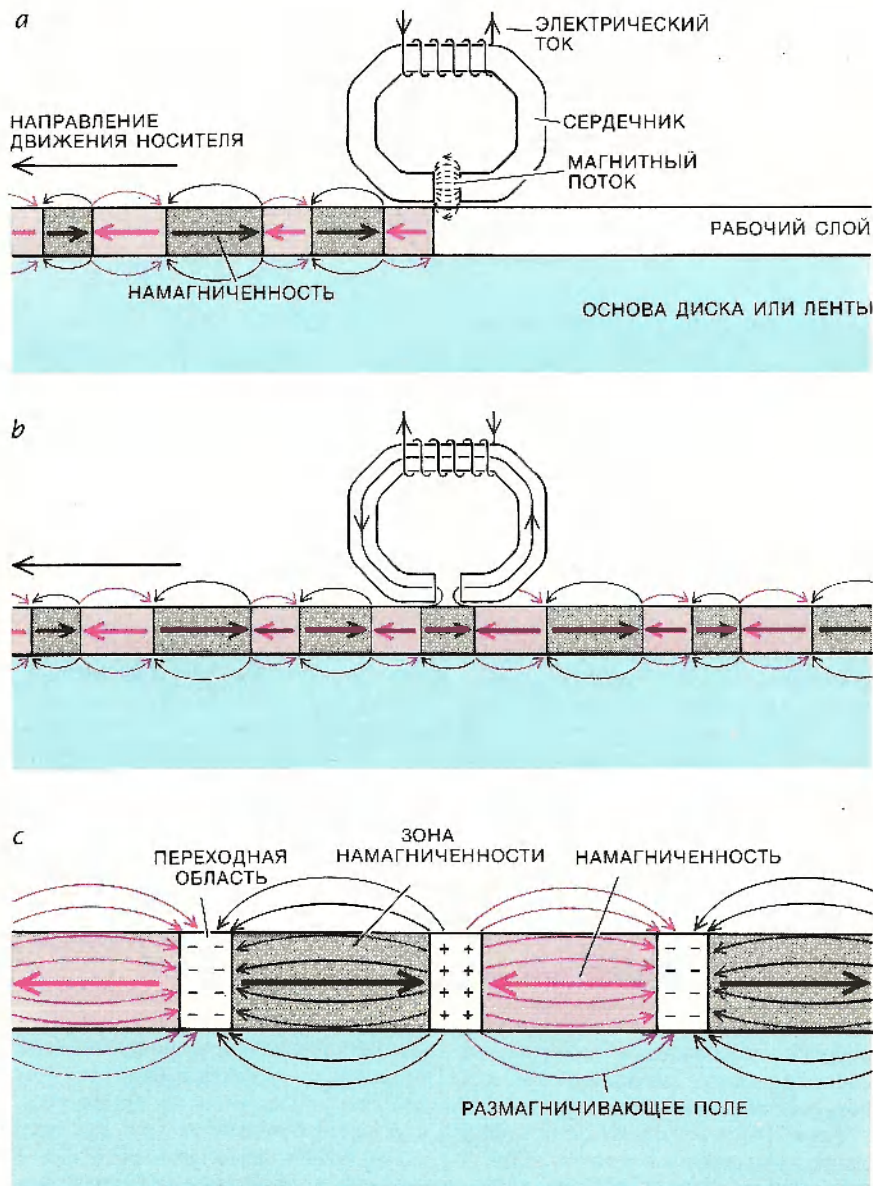
ных по существу сводится к созданию зон намагниченности той или иной полярности в ферромагнитном материале. Это делается при помощи индукционной записывающей головки, состоящей обычно из нескольких витков проводника, намотанных на коль-

цеобразный сердечник из легко намагничиваемого материала. Электрический ток, проходящий по обмотке, создает магнитное поле, пронизывающее сердечник. Когда направление тока меняется на противоположное, ориентация магнитного поля также меняется на обратную. Поскольку силовые линии магнитного поля как бы вступают в том месте, где они проходят через рабочий зазор в кольцеобразном сердечнике, ферромагнитный материал, расположенный в непосредственной близости от зазора, может намагничиваться. Ориентация намагниченности материала зависит от направления силовых линий магнитного поля в зазоре записывающей головки.

Поэтому путем многократного реверсирования тока в обмотке головки в рабочем слое по мере того, как он движется под зазором записывающей головки, создаются зоны остаточной намагниченности, соответствующие записанной информации. Так как данные, генерируемые компьютером, хранятся в виде цепочек двоичных разрядов, последовательность в реверсировании тока (а следовательно, и последовательность зон намагниченности носителя) соответствует последовательности нулей и единиц, представляющих отдельные биты данных.

При чтении данных, закодированных последовательностью зон намагниченности среды, используются магнитные поля, наводимые этими зонами. Эти поля в действительности противоположны ориентации намагниченных зон (см. рисунок слева), и поэтому их обычно называют размагничивающими полями. Поскольку силовые линии размагничивающего поля немного выходят за поверхность рабочего слоя, они пронизывают головку, создавая тем самым магнитный поток в сердечнике при условии, конечно, что головка подведена достаточно близко к поверхности носителя данных. Поэтому чтение происходит по существу с помощью процесса, обратного тому, который имеет место при записи: когда головка проходит над переходной областью, т. е. там, где намагниченность материала переходит от одной полярности к другой, соответствующее изменение магнитного потока через сердечник регистрируется в виде электрического тока, индуцируемого в обмотке сердечника. Изменения величины этого тока детектируются и интерпретируются в виде битов данных.

На диске биты данных обычно записываются на концентрических круговых дорожках. Количество битов



МАГНИТНОЕ ЗАПОМИНАНИЕ ДАННЫХ осуществляется путем намагничивания определенных зон рабочего слоя на движущемся диске или ленте. Эти зоны намагничиваются в одном из двух противоположных направлений при помощи электромагнитной головки, состоящей из легко намагничиваемого сердечника с обмоткой из проводника (а). Когда по обмотке протекает ток, в сердечнике возникает магнитный поток. В зазоре сердечника силовые линии магнитного потока выходят за его границы и намагничивают проходящий под головкой магнитный материал. Если направление тока меняется на противоположное, ориентация намагниченности в рабочем слое также меняется на обратную. Данные, записанные таким образом, могут быть считаны, поскольку магнитное поле зон намагниченности простирается за пределы поверхности носителя. При движении носителя сердечник головки пронизывается изменяющимся магнитным потоком, который индуцирует ток в обмотке (b). Если внимательно приглядеться к зонам намагниченности и создаваемым ими полям (c), то видно, что поля в действительности начинаются и заканчиваются в промежутках между этими зонами, в так называемых переходных областях. Поскольку поля препятствуют намагничиванию среды, их называют размагничивающими полями.

на одной дорожке (т. е. линейную плотность записи) можно до какой-то степени увеличить, сузив переходные зоны и тем самым разместив больше зон намагниченности на дорожке. Однако на практике уменьшать переходные зоны можно лишь до некоторого предельного размера. Зоны намагниченности на дорожке легко представить в виде цепочки прямоугольных постоянных магнитов по всей длине окружности. Переходные зоны отделяют друг от друга полюсы (северный и южный) намагниченных зон от одноименных полюсов соседних зон. Сузить переходную область — значит сблизить одноименные магнитные полюсы, однако ферромагнитный материал противодействует такому сближению, поскольку одноименные полюсы отталкиваются друг от друга. Если же, с другой стороны, зоны намагниченности сделать слишком малыми по отношению к размерам переходных областей, то размагничивающие поля могут оказаться достаточно сильными, чтобы реверсировать остаточную намагниченность зон. Выход из этой дилеммы заключается в том, чтобы применять ферромагнитный материал, отличающийся большой коэрцитивной силой. Последняя пропорциональна интенсивности магнитного поля, которое должно быть приложено, чтобы реверсировать полярность намагниченности материала.

Другой способ повысить линейную плотность записи на дорожке заключается в том, чтобы уменьшить толщину рабочего слоя. За счет этого можно ослабить размагничивающее поле, потому что переходные области, в которых возникают размагничивающие поля, также становятся тоньше и порождают более слабое поле. В то же время, если рабочий слой сделать слишком тонким, то размагничивающие поля, выходящие за пределы рабочего слоя, будут слишком слабыми, чтобы их можно было детектировать, и, следовательно, данные, закодированные зонами намагниченности, будет уже невозможно прочесть.

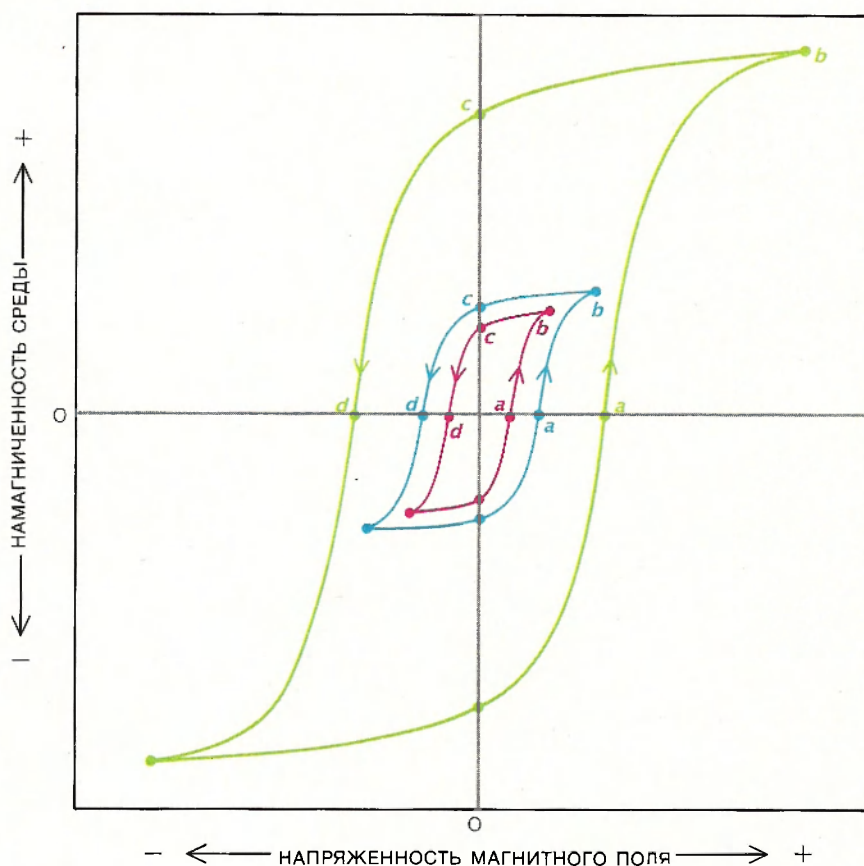
Здесь опять же может помочь тщательный подбор материала для рабочего слоя. Если материал характеризуется сильной остаточной намагниченностью, то его можно наносить в относительно небольшом количестве. Следовательно, можно достичь уменьшения толщины рабочего слоя, сохранив ту же амплитуду считываемого сигнала в головке. Таким образом, как высокая намагничиваемость материала, так и его высокая коэрцитивная сила являются желательными свойствами, для того чтобы можно

было повышать линейную плотность записи без потери сигнала при последующем считывании записанной информации.

ПОСКОЛЬКУ игловидные частицы окиси железа (в виде так называемой гамма-окиси железа), зафиксированные в связующем лаке, обладают обоими желаемыми характеристиками (высокой намагниченностью и высокой коэрцитивной силой), этот материал получил наибольшее распространение в качестве носителя записи. Чтобы еще больше повысить коэрцитивную силу порошка окиси железа, ее частицы часто покрываются тонким слоем кобальта. Другим распространенным материалом с вы-

сокой коэрцитивной силой являются частицы двуокиси хрома, фиксируемые в связующем лаке. Частицы двуокиси хрома обладают практически той же коэрцитивной силой, что и частицы окиси железа с кобальтовым покрытием, но отличаются от последних более регулярной формой. Считается, что более однородные по форме и размерам частицы равномернее распределяются в связующей среде и образуют в результате более качественный носитель информации.

Для прогрессивных систем с повышенной плотностью записи разрабатываются также материалы из частиц чистого металла, например железа, поскольку они обладают еще более ярко выраженными характеристи-



ОСТАТОЧНАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ И КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА порошка окиси железа (красный), двуокиси хрома (синий) и тонкой пленки металлического сплава (зеленый) представлены соответственно высотой и шириной своей петли гистерезиса — замкнутой кривой, изображающей зависимость намагниченности каждой среды в зависимости от напряженности приложенного магнитного поля. Петли гистерезиса показывают, что при усилении поля намагниченность также возрастает от нуля (а) до максимального значения (b). Если поле затем убрать, намагниченность среды не падает до нуля (с), она может быть сведена к нулю, только если приложить поле противоположного направления и довести его до величины, известной как коэрцитивная сила материала (d). Коэрцитивная сила — это мера сопротивления материала попыткам изменить направление его намагниченности на обратное. Материал, предназначенный для хранения данных с высокой плотностью записи, должен обладать высокой остаточной намагниченностью и высокой коэрцитивной силой, другими словами, его петля гистерезиса должна быть высокой и широкой. Согласно этому критерию, наиболее высокую плотность записи могут обеспечить тонкопленочные сплавы, за ними следует двуокись хрома и окись железа.

ками намагнитченности и коэрцитивной силы по сравнению с материалами, применяемыми в настоящее время в качестве носителя записи. Проблема, возникающая в связи с использованием частиц чистого железа, заключается в том, что они настолько малы и настолько сильно намагнитчиваются, что их трудно отделить друг от друга, а это затрудняет их равномерное рассеяние в связующем веществе. К тому же чистое железо легко окисляется; мелкие частицы железа буквально сгорают при контакте с воздухом. По этой причине при изготовлении носителя с частицами нужно обращаться чрезвычайно осторожно. Кроме того, связующее вещество носителя записи не только должно прикреплять частицы к подложке, но и предохранять их от водяных паров и кислорода воздуха. Наконец, чистое железо по своим механическим свойствам мягче окиси и потому более подвержено износу.

Хотя порошковые материалы, несомненно, будут и дальше применяться в качестве носителя информации в магнитных устройствах внешней памяти, в последнее время значительное влияние на рынок таких устройств стали оказывать тонкие пленки металлических сплавов, содержащие главным образом такие металлы, как никель и кобальт. В отличие от порошкового рабочего слоя тонкие

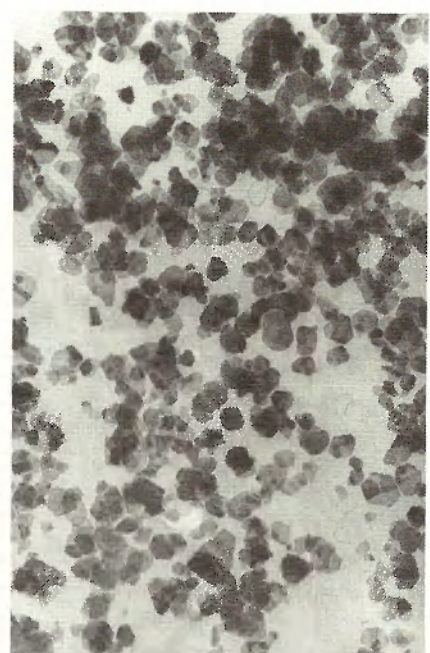
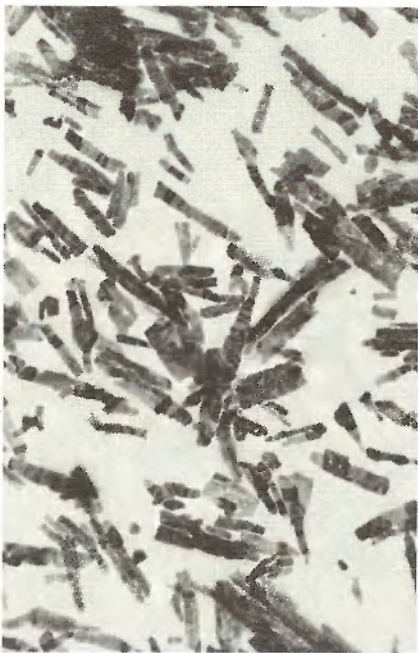
пленки имеют поликристаллическую структуру: они состоят из зерен, или крошечных кристаллов магнитного материала. В принципе эти зерна ведут себя так же, как и частицы порошкового материала, но упакованы значительно плотнее, чем частицы обычных носителей. Поэтому тонкопленочные носители могут обладать большей коэрцитивной силой по сравнению с носителями на основе частиц, кроме того, они сильнее намагнитчиваются.

В большинстве случаев тонкопленочный рабочий слой наносится на поверхность диска посредством электролитического осаждения. Для этого диск погружается в ванну с раствором, содержащим помимо других веществ тот материал, из которого должен состоять рабочий слой поверхности диска. Химический состав раствора, его температура и режим механического перемешивания влияют на окончательный состав и свойства получаемого покрытия.

Другой процесс, при помощи которого тонкие металлические пленки наносятся на субстрат, это напыление. Напыление производится в герметичной камере с откачанным воздухом, содержащей инертный газ, такой, как аргон. В камере имеется отрицательно заряженный электрод, называемый катодом, и еще один электрод, на котором поддерживается близкий

к «земле» потенциал и который называется анодом. Материал, который должен напыляться на субстрат, находится в электрическом контакте с катодом. Субстрат (обычно представляющий собой пластинку диска) поддерживается, как правило, под нулевым потенциалом и располагается в непосредственной близости от заряженного материала. Раскаленная нить ионизирует аргон, заполняющий камеру, а высокое отрицательное напряжение на катоде (порядка 1000 В и более) притягивает положительные ионы аргона к материалу, находящемуся в контакте с катодом. Ионы аргона бомбардируют материал с такой высокой скоростью, что выбивают из него отдельные атомы или целые кластеры атомов, которые осаждаются на находящийся поблизости субстрат.

Пока метод электролитического нанесения тонких пленок используется шире, чем метод напыления. Отчасти это объясняется тем, что промышленные установки напыления дороже установок электролитического нанесения пленки. Однако в будущем пленки, получаемые напылением, могут полностью вытеснить покрытия, нанесенные при помощи электролиза, потому что в первые легче добавлять микроэлементы таких металлов, как хром и рений, повышающих коэрцитивную силу рабочего слоя.



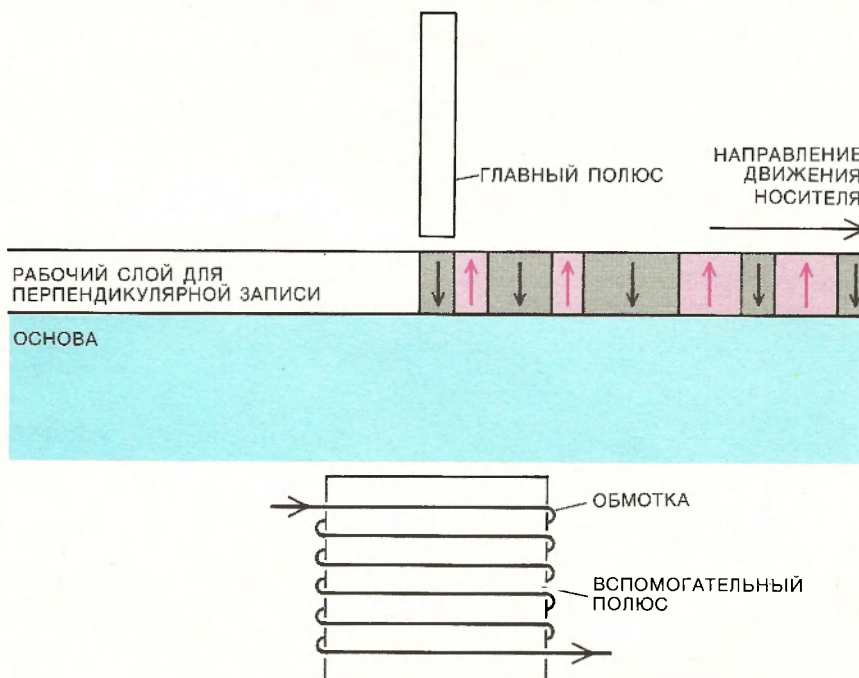
ПОРОШОК МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА в клеобразном связующем лаке — то, из чего обычно делается рабочий слой для записи данных. Наиболее широко используются материалы, содержащие гамма-окись железа (*слева*). Некоторые изготовители магнитных носителей утверждают, что поскольку частицы диоксида хрома (*в середине*) более однородны по форме, то их можно ровнее рассеять в связую-

щем лаке. У обоих материалов преимущественное направление намагнитчивания совпадает с продольной осью частиц. Частицы феррита бария (*справа*) имеют форму плоских шестигульников. Поскольку преимущественное направление намагнитчивания частиц перпендикулярно их плоскости, этот материал годится для носителей с перпендикулярной записью (см. следующий рисунок).

ПОМИМО тщательного подбора магнитных свойств носителя записи некоторую роль в улучшении технических показателей магнитных запоминающих устройств могут сыграть и изменения в конструкции головки записи-чтения. В частности, если располагать головку ближе к рабочему слою носителя или уменьшить высоту «полета» головки, то это позволит повысить амплитуду сигнала как в рабочем слое, так и в головке. За счет более сильного сигнала устройство сможет функционировать быстрее и надежнее. Однако на практике уменьшение высоты полета головки в дисковых устройствах сопряжено с очень большими трудностями. В действительности зазор между головкой и поверхностью жестких дисков уже сейчас настолько мал, что даже самое незначительное загрязнение поверхности пылью, отпечатками пальцев или частицами дыма может привести к тому, что головка врежется в диск, уничтожив записанные на нем данные. (По этой причине современные жесткие диски сконструированы таким образом, что их невозможно извлечь из специальных герметичных контейнеров.)

Даже в ленточных магнитофонах и дисководах, работающих с флоппи-дисками, т. е. устройствах, обычно считающихся представителями «контактного» способа записи, существует некоторый зазор между головкой чтения-записи и поверхностью носителя данных. Например, на рабочий слой часто наносится покрытие из защитного лака, чтобы уменьшить механический износ головки и носителя данных. Кроме того, неровности на поверхности носителя и непостоянство относительной скорости последнего заставляют головку не скользить по поверхности, а двигаться вдоль нее прерывисто, лишь иногда касаясь ее. В принципе этот зазор в записывающих устройствах контактного типа можно было бы уменьшить, нанося более тонкий слой защитного лака, делая поверхность носителя более гладкой и плотнее прижимая головку к носителю, но подобные меры привели бы к более быстрому износу и головки и носителя данных.

Еще одно возможное изменение конструкции головки, позволяющее увеличить линейную плотность записи, заключается в том, чтобы сузить зазор в сердечнике головки. Сужение этого зазора приводит к уменьшению размеров областей намагниченности на рабочем слое, а за счет этого можно увеличить количество таких зон на дорожке. Сердечники большинства магнитных головок делаются из феррита, содержащего окиси железа и



ПЕРПЕНДИКУЛЯРНАЯ ЗАПИСЬ осуществляется при помощи двух полюсов (стержней) на противоположных сторонах от магнитного носителя данных. Когда в обмотке большого вспомогательного полюса протекает ток, в стержне устанавливается магнитный поток. Он недостаточно силен, чтобы намагнитить среду рабочего слоя, но может намагнитить главный полюс на противоположной стороне. В результате среда носителя намагничивается в направлении, перпендикулярном своему движению под действием полей от обоих полюсов. Поскольку зоны намагниченности не прилегают друг к другу, полюс к полюсу, как при обычной записи, переходные области между ними уже, что позволяет разместить больше битов на дорожке носителя данных.

других металлов, таких, как марганец, никель и цинк. За последние пять лет ширина зазора ферритовых головок была уменьшена от 2,5 до 0,5 мкм. Более того, в последнее время появилась возможность изготавливать более совершенные записывающие головки на керамическом субстрате с использованием методов, заимствованных из технологии изготовления полупроводниковых микроприборов. У этих миниатюрных головок, сделанных из тонкой пермалоевой пленки (сплав никеля и железа), ширина рабочего зазора в настоящее время примерно равна 0,5 мкм; в будущем зазор в тонкопленочных головках может быть уменьшен еще вдвое.

ДРУГИЕ изменения в конструкции головки, хотя и не повышающие непосредственно линейной плотности битов на дорожке, могут тем не менее обеспечить более высокую общую плотность записи данных на носителе. Наиболее очевидное из таких изменений — это уменьшение ширины головки, поскольку этот параметр в свою очередь определяет ширину дорожки. При меньшей ширине дорожки их число на поверхности диска можно увеличить. Однако при этом

головку труднее установить точно над дорожкой и избежать помех в виде магнитных наводок с соседних дорожек. Поэтому, хотя повышение поверхностной (в отличие от линейной) плотности записи данных, по-видимому, в основном будет достигаться за счет уменьшения ширины дорожки, практически это станет возможным лишь при условии, что будут разработаны более сложные головки, способные точнее устанавливаться на дорожке. Намечающаяся тенденция к усложнению конструкции головок должна ускорить переход от ферритовых головок к тонкопленочным.

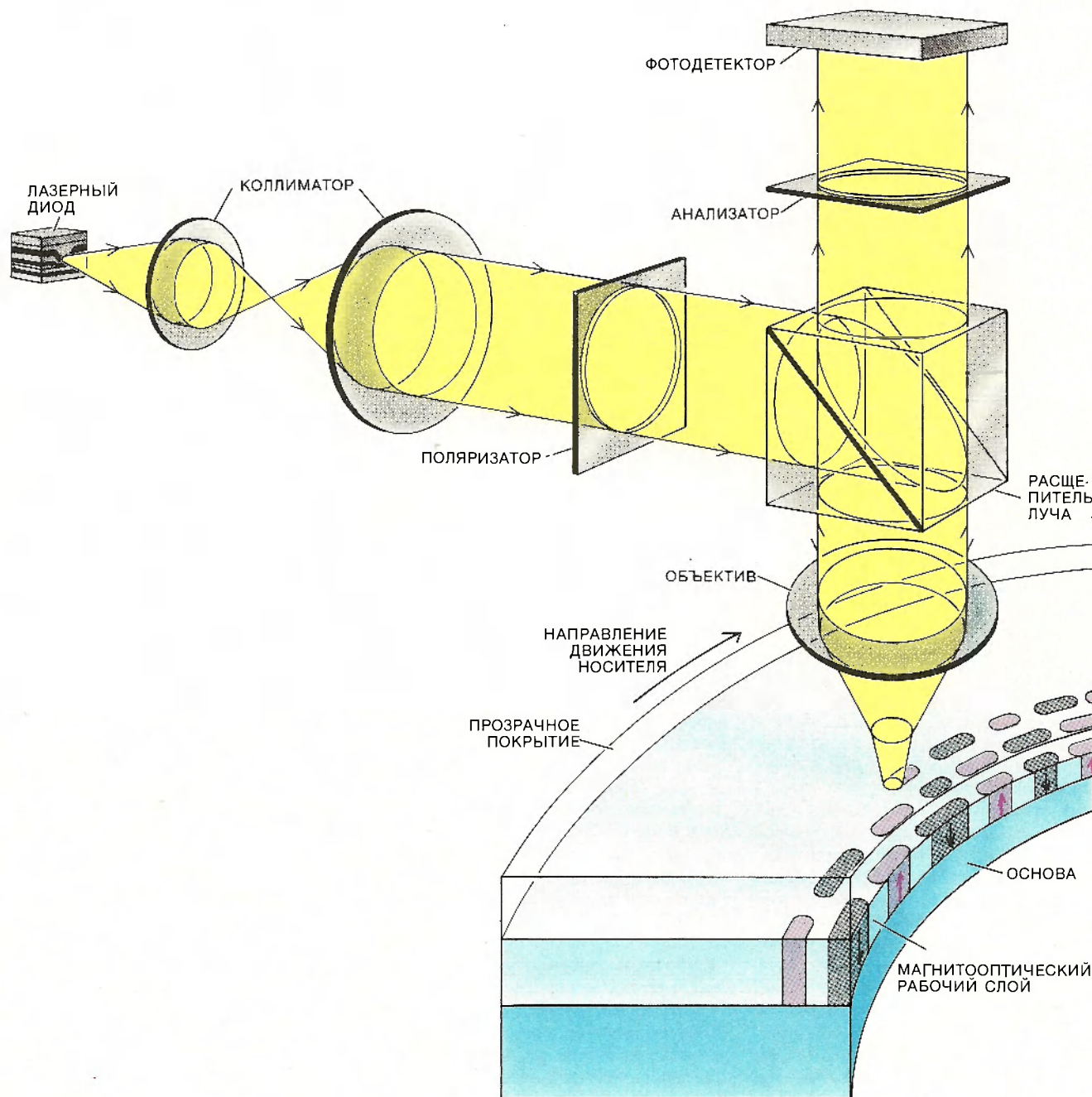
Шаг в этом направлении был недавно сделан фирмами IBM и Control Data, разработавшими устройство, сочетающее в себе обычную индукционную головку для записи и головку нового типа для считывания, а именно магниторезистивную головку. Магниторезистивные материалы обладают свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от собственной намагниченности. Поэтому, когда головка из подобного материала проходит над рабочим слоем, изменение намагниченности в слое приводит к изменению сопротивления головки. Если к

головке приложен постоянный ток, то изменения ее сопротивления легко обнаружить по изменению падения напряжения. Магниторезистивные головки могут быть по крайней мере на порядок более чувствительны, чем индукционные, по отношению к магнитному потоку, исходящему из намагниченных зон рабочего слоя. Более того, их выходной сигнал определяется величиной полного потока, а не скоростью его изменения, как в ин-

дукционных головках. В то время как электрический сигнал на выходе индукционной головки зависит от скорости прохождения под головкой носителя данных, сигнал от магниторезистивной головки не зависит от скорости носителя. Следовательно, использование магниторезистивных головок наиболее предпочтительно в тех случаях, когда скорость движения носителя относительно головки мала или непостоянна, как это обычно име-

ет место в накопителях на магнитной ленте.

Поскольку магниторезистивная головка не способна породить внешнее магнитное поле, она годится только для считывания данных. Поэтому магниторезистивная головка должна всегда сочетаться в устройстве с индукционной головкой для записи. Но, несмотря на это, магниторезистивная головка вовсе не обязательно должна быть отдельной деталью



В МАГНИТООПТИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ для чтения и записи данных применяется лазер. При записи лазер разогревает маленькую зону носителя; с ростом температуры коэрцитивная сила материала падает, благодаря чему можно намагнитить разогретую зону слабым магнитным полем. При чтении данных луч лазера переключается на

меньшую мощность и поляризуется. Поскольку плоскость поляризации поворачивается при отражении луча от намагниченной среды, второй поляризующий фильтр (называемый анализатором) может преобразовать изменение поляризации в изменение интенсивности светового луча, которое в свою очередь фиксируется фотодетектором.

конструкции. Поскольку магниторезистивные головки очень тонки (0,03—0,05 мкм), их можно вставлять в зазор ферритовой или даже тонкопленочной индукционной головки записи. Сочетание магниторезистивной читающей головки с индукционной записывающей головкой позволяет не только повысить чувствительность при считывании, но и решить проблему помех от соседних дорожек, поскольку ширину зоны считывающего элемента можно сделать уже ширины дорожки.

СТРОГО ГОВОРЯ, все, о чем речь шла до сих пор, относится к продольной магнитной записи, когда чтение и запись данных соответствуют изменению состояния намагниченности с ориентацией поля, параллельной поверхности диска или ленты. Однако можно сделать и такой рабочий слой, у которого преимущественное направление намагничивания было бы перпендикулярным плоскости носителя. Чаще всего в качестве материала для перпендикулярной записи применяются сплавы кобальта и хрома, наносимые методом напыления. В этих поликристаллических материалах все зерна ориентированы таким образом, что в целом предпочтительное направление намагничивания оказывается перпендикулярным к поверхности пленки. К сожалению, такие тонкие металлические пленки не обладают достаточной износостойкостью. По этой причине сейчас проводятся эксперименты с порошковым материалом, ферритом бария, который также пригоден в качестве рабочего слоя для перпендикулярной записи. Частицы феррита бария можно смешивать с порошками чрезвычайно износостойчивых материалов, а рабочий слой покрывать защитными лаками, чтобы минимизировать механический износ.

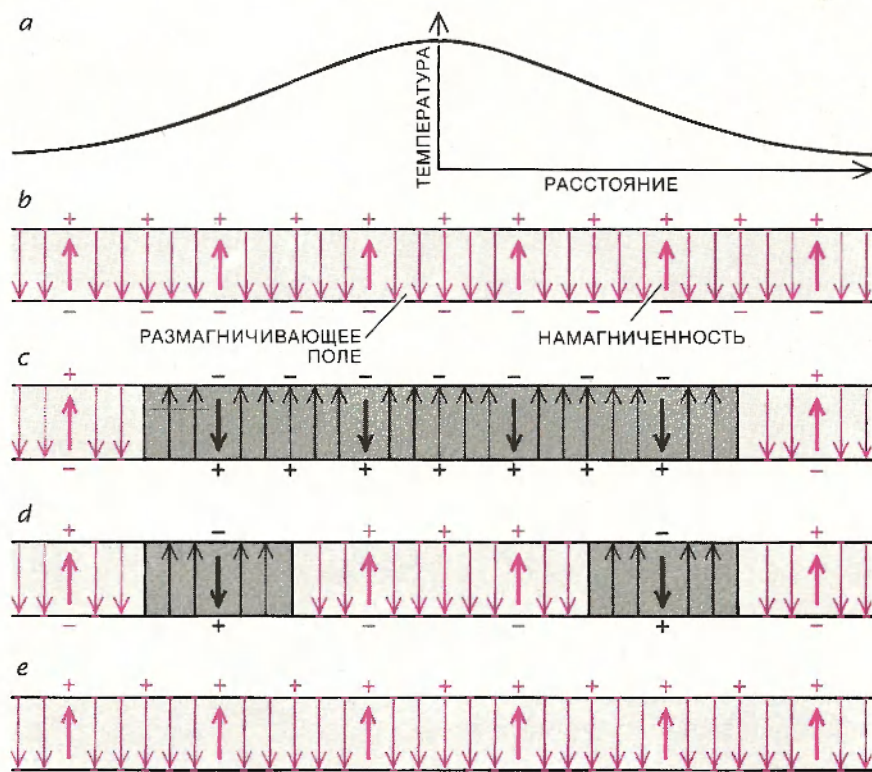
Для перпендикулярной записи было предложено много различных конструкций головки. В одной из этих конструкций головка состоит из двух отделенных друг от друга полюсов: большой вспомогательный полюс располагается на одной стороне носителя записи, а тонкий главный полюс — с противоположной стороны и ближе к носителю. На вспомогательный полюс намотаны витки проводника. Когда по обмотке проходит ток, в полюсе возникает магнитный поток. Магнитное поле от вспомогательного полюса, хотя и недостаточное для того, чтобы самостоятельно намагничивать материал рабочего слоя, может намагничивать главный полюс, расположенный по другую сторону от носителя данных. Сов-

местное магнитное поле от обоих полюсов оказывается уже достаточно сильным, чтобы намагничивать материал рабочего слоя в направлении, перпендикулярном плоскости носителя. Зоны намагниченности как бы поставлены вертикально. Информация, закодированная в таких перпендикулярно намагниченных зонах, может быть затем считана двухполюсной головкой во многом аналогично тому, как продольно намагниченные зоны считываются обычной головкой. Изменения ориентации магнитного поля в проходящем мимо головки носителя вызывают изменение магнитного потока во вспомогательном полюсе. Это изменение магнитного потока регистрируется, когда индуцируемый в обмотке полюса ток меняет направление.

ПОСКОЛЬКУ противоположно намагниченные зоны в рабочем слое с перпендикулярной записью не

расположены полюс к полюсу (как в слоях с продольной записью), размагничивающие поля становятся слабее с увеличением линейной плотности записанных данных. Еще одно преимущество перпендикулярной записи, объясняющееся другим расположением зон намагниченности, заключается в том, что толщину рабочего слоя можно увеличить, сделав его тем самым более износостойчивым и не увеличивая при этом размера переходных областей. Кроме того, благодаря более слабому размагничивающим полям в расположении и ширине намагниченных зон наблюдается меньший разброс, поэтому при считывании и записи возникает меньше ошибок.

Несмотря на указанные преимущества перпендикулярной записи, этот метод еще не был применен в сколько-нибудь значительном промышленно выпускаемом устройстве. Отчасти этот факт можно объяснить



РАЗМАГНИЧИВАЮЩИЕ поля в магнитооптическом рабочем слое могут использоваться для записи и стирания намагниченных зон, в результате чего отпадает необходимость во внешнем магнитном поле. Под действием лазерного импульса в среде устанавливается характерное распределение температуры (а), которое уменьшает коэрцитивную силу однородно намагниченной зоны (b), что позволяет внутреннему размагничивающему полю изменить направление намагниченности нагретой зоны (с) на обратное. Размагничивающее поле области с измененной намагниченностью также реверсируется, так что последующий импульс может переключить намагниченность этой зоны на исходную ориентацию (d). Внешние области дважды реверсированной зоны нестабильны и теряют свою намагниченность, оставляя зону в исходном состоянии (e).

тем, что для реализации потенциально более высокой линейной плотности битов, которую может обеспечить перпендикулярный метод записи, главный полюс головки, вероятно, придется располагать ближе к рабочему слою носителя по сравнению с тем случаем, когда используется головка для обычной продольной записи. Однако, как уже говорилось выше, это вообще одно из главных препятствий в достижении более высокой линейной плотности битов при любом способе записи.

Основное же препятствие на пути промышленного освоения метода

перпендикулярной записи состоит в том, что его невозможно вводить по частям, переделывая по очереди компоненты системы записи, хранения и чтения информации. Необходимо одновременно изменить и носитель данных, и головки чтения-записи, и электронные компоненты в узлах, непосредственно задействованных в обработке сигнала. И хотя несколько фирм на протяжении последнего десятилетия очень настойчиво исследовали методы перпендикулярной записи, производители внешней памяти за этот период еще больше утвердились в применении технологии продольной

записи. Поскольку достижение более высокой плотности записи представляется возможным за счет продолжающегося прогресса в уже установившейся технологии (главным образом путем введения тонкопленочных носителей), у фирм нет веских оснований для того, чтобы вкладывать средства, требуемые для перехода на новую технологию.

По всей видимости, продольный метод записи будет по-прежнему доминировать, по крайней мере для жестких дисков. С другой стороны, маловероятно, что тонкопленочные носители окажутся достаточно устойчивыми по отношению к механическому износу, которому они будут подвергаться в ленточных магнитофонах и устройствах, работающих с гибкими дисками, где головки чтения-записи находятся в контакте с носителем данных. Для устройств «контактного типа» технология перпендикулярной записи может оказаться реальной альтернативой, но при условии, что будет найден материал, достаточно устойчивый к механическому износу.

НАБЛЮДАЮЩИЙСЯ быстрый прогресс в области магнитных устройств внешней памяти, а также крупные масштабы их производства практически исключают возможность появления на рынке в ближайшее пятилетие значительного количества каких-либо других конкурирующих изделий. Тем не менее существуют некоторые технологии, обещающие стать со временем конкурентоспособными. Например, технология оптической записи, которая совершенно не нуждается в магнитных носителях, дает более высокую линейную плотность записи и отличается меньшей стоимостью хранения данных в расчете на один бит по сравнению с устройствами на магнитных дисках. Пока же оптические устройства записи и чтения имеют значительно более низкую производительность по сравнению с магнитными устройствами, т. е. они обладают меньшими скоростями записи и чтения и имеют большее время доступа к данным. К тому же носители информации с оптической записью не могут использоваться многократно: однажды записанную на оптический диск информацию стереть уже нельзя, ее можно только многократно считывать. Заменить же старые данные новыми, записав их на месте старых, оптический метод записи не позволяет.

Ограничения, присущие оптическим системам хранения данных, можно обойти, а их достоинства можно использовать в гибридных



В НАКОПИТЕЛЕ НА МАГНИТНЫХ ДИСКАХ, созданном фирмой IBM, применены тонкопленочные электромагнитные головки (на концах треугольных держателей), позволяющие записывать данные быстро и с высокой плотностью.

магнитооптических системах, в которых для записи и чтения данных на специальном магнитном носителе используется лазер. Так же как и в носителе для перпендикулярной магнитной записи, доминирующая ось намагничивания материала, из которого состоит рабочий слой магнитооптического диска, перпендикулярна плоскости диска. Ключевое различие между этими двумя носителями состоит в том, что материал для магнитооптической записи обладает высокой коэрцитивной силой при комнатной температуре, но низкой — при высоких температурах. Поэтому лазерный луч в магнитооптических устройствах памяти можно сфокусировать на маленьком участке рабочего слоя, разогреть его до температуры, при которой эту зону можно легко намагнитить, и приложить соответствующее магнитное поле. Как и в материалах для обычной магнитной записи, на магнитооптическом носителе двоичные данные кодируются последовательностью зон намагниченности той или иной ориентации.

При считывании данных используется эффект Керра, заключающийся в повороте плоскости поляризации луча, отразившегося от намагниченной среды. В зависимости от направления намагниченности зоны носителя, вверх или вниз, плоскость поляризации отраженного луча будет повернута либо по часовой стрелке, либо против. Таким образом, читать данные с магнитооптического диска можно, детектируя поворот плоскости поляризации лазерного луча, отразившегося от поверхности диска. Чтение можно производить при помощи того же лазера, который записывает данные, но работающего на меньшей мощности по сравнению с режимом записи.

Наиболее перспективными материалами для магнитооптической записи являются сплавы редкоземельных элементов (таких, как гадолиний и тербий) с металлами переходной группы (такими, как железо и кобальт), напыляемые на поверхность диска. Магнитные моменты отдельных атомов редкоземельных элементов и металлов переходной группы имеют противоположную ориентацию в магнитном поле, так что суммарная намагниченность материала на самом деле определяется разностью намагниченностей его составляющих. Поскольку магнитная проницаемость элементов двух различных групп по-разному зависит от температуры, суммарная намагниченность и коэрцитивная сила сплава могут также зависеть от температуры.

В частности намагниченность ред-

коземельного элемента доминирует в сплаве при низких температурах, а противоположно ориентированная намагниченность металла доминирует при высоких температурах. При определенной промежуточной температуре, которую называют температурой компенсации, суммарная магнитная проницаемость сплава равна нулю. Однако, если температуру поднять достаточно высоко, суммарная магнитная проницаемость снова приблизится к нулю, поскольку тепловое движение атомов станет слишком интенсивным и ориентация магнитных моментов атомов станет случайной. Температура, при которой это имеет место, называется температурой (или точкой) Нееля.

В окрестности точки компенсации коэрцитивная сила стремится к бесконечности. Это объясняется тем, что прикладываемое магнитное поле в данном случае взаимодействует со средой, обладающей очень малой магнитной проницаемостью. С другой стороны, в области, непосредственно прилегающей к точке Нееля, даже слабого магнитного поля оказывается достаточно, чтобы определить направление, в котором намагничиваются атомы металлов переходной группы. Таким образом, магнитооптический носитель обладает большой коэрцитивной силой вблизи точки компенсации, причем эта сила уменьшается по мере того, как температура приближается к точке Нееля.

ХОТЯ УЖЕ давно было известно, что информацию на магнитооптических дисках в принципе можно стирать и записывать заново, многие исследователи до последнего времени полагали, что реверсировать состояние намагниченности в магнитооптическом рабочем слое невозможно с той скоростью, с которой данные записываются на чистый, еще «не тронутый» носитель. Считалось, что поле, необходимое для реверсирования намагниченности среды (даже при разогреве лазером) должно быть слишком сильным. Создать головку, способную генерировать поле такой силы и реверсировать его со скоростью, приемлемой для записи данных, представлялось очень сложным. Поэтому исследователи считали, что для перезаписи данных на магнитооптическом диске его необходимо повернуть на один оборот, чтобы оптическая головка стерла старые данные, и затем еще на один оборот, чтобы записать новые данные, разделяя тем самым скорости стирания данных и их последующей записи. Однако конструкция подобного рода добавила бы несколько миллисекунд ко време-

ни, необходимому для перезаписи дорожки.

В настоящее время уже доказано, что прямая перезапись на магнитооптическом носителе возможна. Все сводится к тому, чтобы сделать размагничивающие поля в рабочем слое диска достаточно сильными (или, что эквивалентно, сделать коэрцитивную силу среды достаточно малой при высокой температуре), так чтобы они переключали намагниченность зоны на обратную всякий раз, когда зона нагревается. Таким образом, никакое внешнее магнитное поле не требуется (см. рисунок на с. 53). В одном из возможных конструктивных решений направление намагниченности зоны диска детектируется маломощной лазерной системой, а затем сравнивается с направлением, соответствующим новому биту данных, который должен быть записан на это место. Если направление намагниченности нужно изменить, включается вторая лазерная система, посылающая световой импульс для разогрева зоны, чтобы размагничивающие поля смогли реверсировать направление намагниченности. В другом варианте первый лазер разогревает рабочий слой в зоне, содержание которой нужно изменить, с помощью импульса, достаточно кратковременного для того, чтобы зоны с реверсированной намагниченностью вернулись в исходное состояние, в то время как ориентация намагниченности других зон остается неизменной. В результате все зоны оказываются намагниченными в одном направлении. Второй лазер испускает затем более длительные световые импульсы, чтобы обратить намагниченность тех зон, которые должны содержать соответствующие биты новых данных. В обоих случаях оба лазерных луча могут фокусироваться одной и той же линзой, а их фокальные точки отстоять друг от друга всего на несколько микрон.

БЛАГОДАРЯ тому что излучение лазера чтения-записи можно сфокусировать в пятно очень маленьких размеров (порядка 0,5 мкм) и луч может следовать за дорожкой с точностью до 0,1 мкм, сами дорожки можно сделать чрезвычайно узкими. Действительно, на примере экспериментальных магнитооптических систем хранения данных было показано, что достижима такая поверхностная плотность данных, которая более чем на порядок выше плотности, характерной для современных устройств на магнитных дисках. Более того, фокусирующая линза системы может находиться на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности носите-

ля и все же обеспечивать высокое разрешение через прозрачный поверхностный слой. Благодаря большому зазору между линзой и рабочим слоем, можно не опасаться, что головка врежется в диск, а прозрачное покрытие защищает рабочий слой от разрушающего воздействия окружающей среды. Кроме того, поскольку частицы, случайно попавшие на поверхность диска, не находятся в фокальной плоскости линзы, они не приводят к возникновению ошибок при условии, что размеры этих частиц достаточно малы. (Именно благодаря этому обстоятельству цифровые компактные диски для звуковой записи, которые также читаются оптическим способом, можно делать съемными.)

Помимо оптических компонентов, служащих непосредственно для чтения и записи, магнитооптическая головка содержит также компоненты, которые поддерживают лазерный луч сфокусированным и позволяют линзе точно следить за дорожкой данных на быстро вращающемся диске. Все эти компоненты обычно конструктивно объединяются в головке, размер стороны которой не превышает двух сантиметров, а масса около 150 г. И все же даже такая, казалось бы, маленькая головка велика по сравнению с магнитной головкой записи. Из-за своей большой массы оптические головки не могут быстро переходить от дорожки к дорожке, и поэтому время прямого доступа к данным на оптических устройствах составляет не менее 0.1 с, что приблизительно на порядок больше, чем на магнитных накопителях.

Тем не менее в будущем время доступа к данным в магнитооптических устройствах, по-видимому, будет значительно меньше. Предлагаются, например, такие конструктивные варианты, в которых линза связана с другими оптическими компонентами посредством оптического волокна. В таких системах двигаться от дорожки к дорожке должна лишь одна деталь, связанная с линзой, а массу этой детали можно снизить до такой степени, что она будет сравнима с массой магнитной головки. В других вариантах предлагается объединить оптику и необходимые электронные компоненты в одном приборе, сделанном по принципу микросхемы. Вполне вероятно, что эти и другие новшества позволят снизить время доступа в магнитооптических устройствах настолько, что оно будет сравнимо со временем доступа, характерным для магнитных устройств.

Способность непосредственно записывать новые данные на место старых в сочетании с очень высокой плотностью данных (порядка 10 млн.

символов на квадратный сантиметр), гарантией того, что головка не врежется в диск, и возможностью sledать оптические носители данных съемными — вот те факторы, благо-

даря которым метод магнитооптической записи станет серьезным конкурентом магнитным методам записи, использующимся в традиционных устройствах внешней памяти.

Наука и общество

Страдают ли животные?

КАК ОБЩЕСТВО должно контролировать деятельность ученых, использующих для своих опытов животных? Доклад на эту тему, зрелый в Национальном научно-исследовательском совете (ННИС) Национальной академии наук, вызывает бурные споры. Мнения членов комиссии, подготовившей проект доклада, разделились. Одни сетуют на то, что рекомендуемые меры контроля в недостаточной степени учитывают интересы животных. В то же время А. Гайтон из Медицинской школы Университета шт. Миссисипи, работающий с лабораторными животными, озабочен тем, что эти меры угрожают научным программам; в связи с этим он даже подготовил «содоклад о положении исследователей, использующих животных, в особенности их крупных видов».

Некоторые ученые хотели бы видеть в докладе признание, что с лабораторными животными иногда обращаются неправильно и что некоторые эксперименты над животными ошибочны. К. Стивенс, президент Института по изучению благосостояния животных, заявила в конце августа, что она не подпишет доклад, поскольку он «абсолютно несбалансирован и в нем имеются существенные пробелы». У. Доддс, руководитель Лаборатории гематологии при Нью-Йоркском отделе здравоохранения, которая отказывалась разводить животных с генетическими дефектами, отметила, что указанный доклад не даст «представления о разнообразии точек зрения среди ученых». Она также не собирается подписывать доклад, если в него не будут внесены изменения.

Главным пунктом в этих спорах является поправка 1985 г. к Акту об отношении к животным, требующая, чтобы институты, использующие в научных целях определенных теплокровных животных, имели специальные комитеты для контроля за использованием этих животных. В такой комитет должен входить по крайней мере один сторонний наблюдатель, который обязан быть в курсе ведущихся исследований и следить за

выполнением определенных правил содержания животных.

Комиссия ННИС первоначально рекомендовала распространить действие указанной поправки на крыс, мышей и птиц, но впоследствии изменила свою позицию. Как подчеркивается в содокладе Гайтона, сделанные вначале изменения представляются собой «ряд компромиссов с движением за гуманное отношение к животным», которое фактически является движением активистов под новой вывеской. По мнению Гайтона, «весьма сомнительно, что какие-либо исследовательские программы, за исключением очень крупных, смогут выжить, если не будут отменены многие из новых правил, что в свою очередь вряд ли произойдет, если Национальный научно-исследовательский совет не окажет в этом вопросе сильную поддержку».

Мнения комиссии разделились также по вопросу использования для продолжительных или повторных экспериментов отлавливаемых животных. В обеих палатах конгресса были выдвинуты предложения, запрещающие любое использование отлавливаемых животных исследователями, работающими по программам Национальных институтов здоровья. Член комиссии ННИС М. де Бейки, первым применивший многие эффективные методики в хирургии сердца, недавно опубликовал ряд статей, в которых указывает, что стоимость собак, выращиваемых специально для научных исследований, колеблется от 275 до 600 долл., в то время как пойманная собака обходится в сумму от 5 до 55 долл. Де Бейки говорит, что большинство отлавливаемых животных не являются потерянными, как это часто утверждается: это либо брошенные, либо бездомные животные, и поэтому они рано или поздно уничтожаются. Следует сказать, что из 10—15 млн. отлавливаемых животных, которых уничтожают каждый год, в научных лабораториях отправляют менее 2%; в лабораториях они подвергаются анестезии и больше не приходят в сознание.

Хотя в настоящее время доклад изучают сторонние эксперты, он, воз-

можно, никогда не представит единство взглядов, которым могли бы руководствоваться законодатели. Как говорится в содокладе Гайтона, необходимы серьезные меры для того, чтобы обеспечить возможность использования отлавливаемых животных для медицинских исследований. Если доклад комиссии ННИС когда-нибудь появится, он, вероятно, будет иметь ряд добавлений и особых мнений отдельных членов комиссии.

Новые сверхпроводники

ПРОДОЛЖАЮТСЯ энергичные поиски методов получения сверхпроводников, действующих при комнатной температуре. Я. Нараян из Университета шт. Северная Каролина определил атомную структуру новой кристаллической фазы смешанного оксида иттрия, бария и меди — материала, к которому сейчас приковано пристальное внимание исследователей в области сверхпроводимости. Как полагает Нараян, эта фаза начинает проявлять сверхпроводимость при температуре ниже 290 К, которая значительно выше по сравнению с ранее известной фазой, проявляющей сверхпроводимость лишь при температурах ниже 95 К. Сотрудник Научно-исследовательской лаборатории фирмы Lockheed в Пало-Альто Чао-Юань Н. Хуан сообщил, что ему удалось зарегистрировать воспроизводимые признаки сверхпроводимости в одном соединении (он не называет, в каком именно) при температуре 52 °С.

Несмотря на такой прогресс, Дж. Халм из Научно-исследовательского центра Вестингауза, возглавляющий Совет по новым материалам при Национальной академии наук США, предупреждает, что «потребуется сделать еще не одно открытие, прежде чем такие материалы найдут широкое практическое применение». Открытая Нараяном новая фаза смешанного оксида иттрия, бария и меди, в том виде, в каком она была получена, нестабильна. Кроме того, необычная атомная структура этих новых сверхпроводников, представляющих собой керамические материалы, создает немало трудностей при попытках их применения. Такие материалы состоят из анизотропных кристаллических зерен: их электропроводность и другие свойства меняются в зависимости от оси, вдоль которой эти свойства измеряются. В объеме образца все зерна ориентированы в различных направлениях и не находятся в близком контакте. Чтобы обеспечить высокую плотность тока, возможно, потребуется ориентиро-

вать зерна в одном направлении и привести их в тесный контакт. Д. Финнимор из Эймской лаборатории при министерстве энергетики США сообщил, что ему и его коллегам удалось добиться некоторого успеха в «выравнивании» ориентации зерен в процессе изготовления материала путем применения магнитного поля.

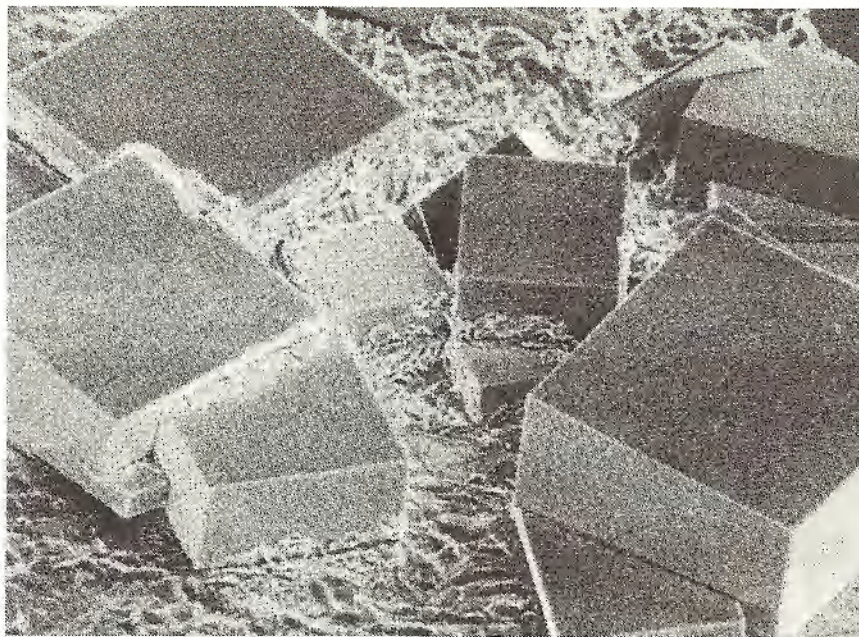
Объемные образцы очень хрупкие и изготовленные одним и тем же способом, проявляют неодинаковые свойства сверхпроводимости. Усовершенствованные методы их получения позволили значительно увеличить как максимально допустимую величину тока, так и максимальную напряженность магнитного поля, при которых они продолжают сохранять сверхпроводимость, но эти предельные значения намного ниже тех, которые требуются для проводников в реальных условиях.

Другие ограничивающие факторы могут вызвать проблемы в производстве гибридных полупроводниковых и сверхпроводниковых микросхем, на которых могли бы создаваться сверхбыстродействующие вычислительные машины. При изготовлении сверхпроводящих керамик их необходимо нагревать до температуры, близкой к 900 °С, которую не выдерживают полупроводниковые приборы. Кроме того, примесные ионы легко внедряются в их кристаллическую структуру и нарушают свойства сверхпроводимости.

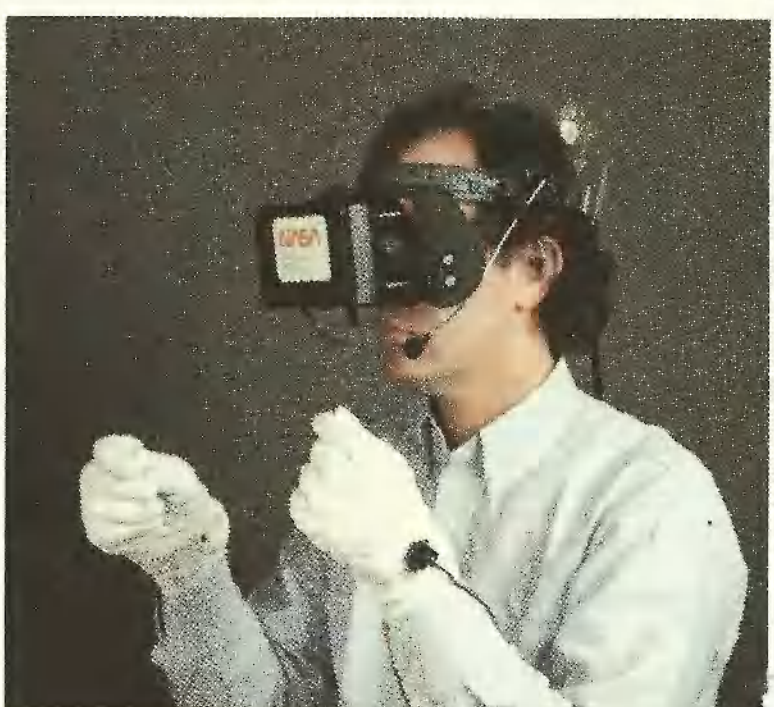
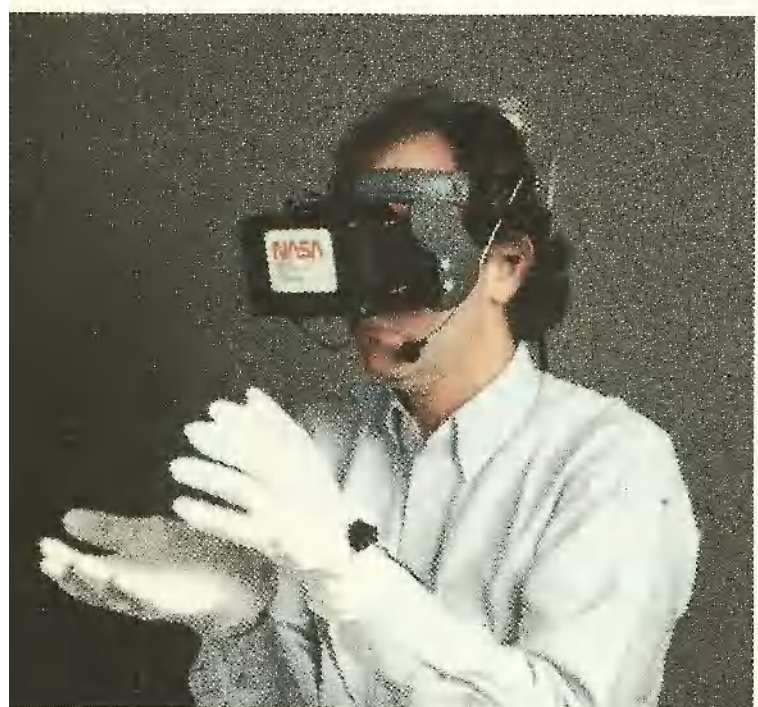
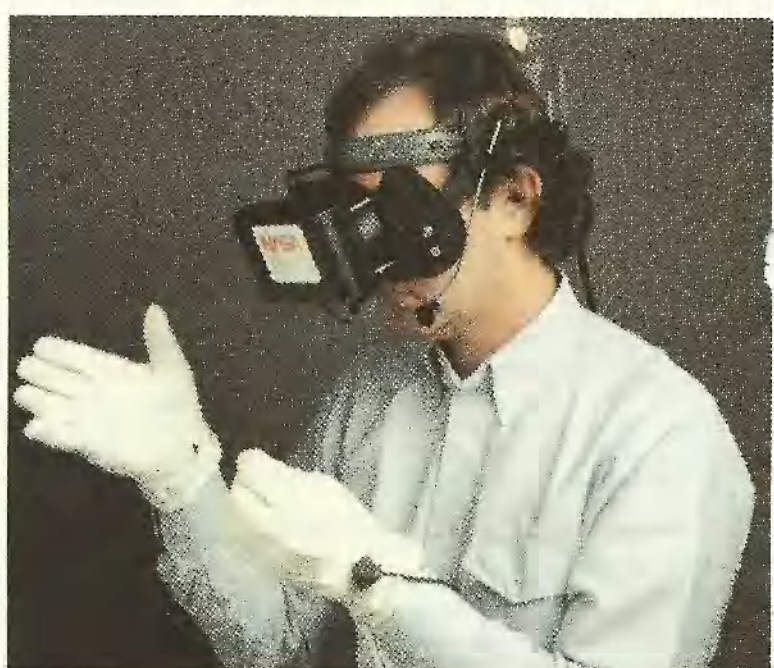
Администрация Рейгана быстро

начала стимулировать исследования в новой области. Финансирование работ по сверхпроводимости в Аргоннской национальной лаборатории будут увеличены с 1,5 млн. долл. в прошлом году до 10 млн. долл. в следующем году. Министерство обороны планирует затратить на те же цели 150 млн. долл. в течение последующих трех лет. Объемы финансирования других организаций также растут. Аргоннская лаборатория, Эймская лаборатория и Лаборатория им. Лоуренса в Беркли названы центрами по исследованиям в области сверхпроводимости.

Правительство предприняло также ряд политических мер, направленных на укрепление лидирующего положения США в данной области. Президент пересмотрел предложение о внесении поправок в закон о свободе информации, касающихся ограничения доступа иностранных компаний к исследованиям, финансируемым правительством, и научные атташе при иностранных посольствах были исключены из списка участников двухдневного правительственного семинара по вопросам развития американской промышленности, который состоялся этим летом в Вашингтоне. Окажутся ли эти меры эффективными? В конце концов, как замечает Д. Рункл из Американской ассоциации научных достижений, первый керамический материал, обладающий сверхпроводимостью при высокой температуре, был создан в Швейцарии.



МОНОКРИСТАЛЛЫ соединения $YBa_2Cu_3O_x$ становятся сверхпроводящими при температурах, близких к 90 К. Кристаллы выращены сотрудниками фирмы IBM Д. Кайзером и Ф. Хольцбергом.



Человеко-машинные интерфейсы

Почему общаться со сложными компьютерами должно быть непременно трудно? Суперкомпьютеры следующего поколения будут способны в деталях создавать «искусственные реальности», которые облегчат взаимодействие человека с машиной

ДЖЕЙМС Д. ФОЛИ

ПРИМЕРОМ ТОГО, насколько умело современные компьютерные системы способны воспроизводить действительность, может служить имитатор полета. Компьютеры имитируют звуки, силы и движение, ощущаемые летчиком, а специализированные суперкомпьютеры создают правдоподобную визуальную обстановку. Последняя задача особенно трудна, но суперкомпьютеры умеют быть великолепными мастерами иллюзий.

Зачем, однако, ограничивать моделирующие возможности компьютерной техники кабиной пилота? Не может ли машина, способная создать у человека ощущение полета, синтезировать и хорошо известные ситуации для научных задач? Не может ли она создать среду общения более естественную, чем привычный ввод команд с клавиатуры? Короче, возможно ли запрограммировать компьютер для создания «искусственной реальности», с которой взаимодействовал бы пользователь?

Для многих ученых и инженеров ответ на этот вопрос — однозначное «да». Уже существуют проекты «искусственных реальностей», более сложные, чем моделирование полета. Развиваются техника и методы интерфейса, которые сделают суперкомпьютеры более «отзывчивыми» по отношению к человеческой манере общения, включая прикосновение, жесты, речь и даже нечто вроде зрительного контакта. Создавая более реалистичные изображения, супер-

компьютеры следующего поколения позволят также непосредственно манипулировать этими изображениями и испытывать тактильные и силовые ощущения. Датчики будут определять положение головы оператора и следить за движениями глаз; программы распознавания голоса позволят компьютерам понимать разговорную речь.

Исследователи надеются, что благодаря «искусственным реальностям» осваивать суперкомпьютеры и пользоваться ими станет приятнее и эффективнее. Тщательно разработанные интерфейсы могут сделать для ученых и инженеров то же, что программы работы с электронными бланками, такие, как Lotus 1—2—3, сделали для бухгалтеров. Конечно, «искусственные реальности» обещают выгоды в одних областях больше, чем в других. Трудно вообразить, например, какую пользу можно извлечь из трехмерных представлений технической документации и из экранов размером во всю стену. С другой стороны, для решения многих научных задач, в особенности тех, которые могут быть представлены в трех измерениях, требуется большая степень взаимодействия между человеком и машиной.

ИНТЕРФЕЙС между человеком и компьютером может стать последним барьером в проектировании компьютеров. В последние несколько лет стоимость аппаратуры резко упала, стоимость программного обеспе-

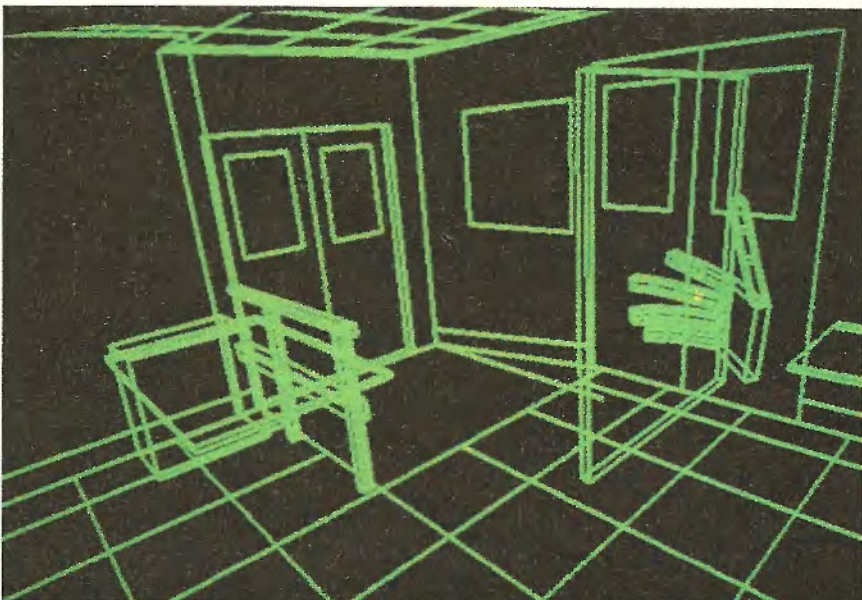
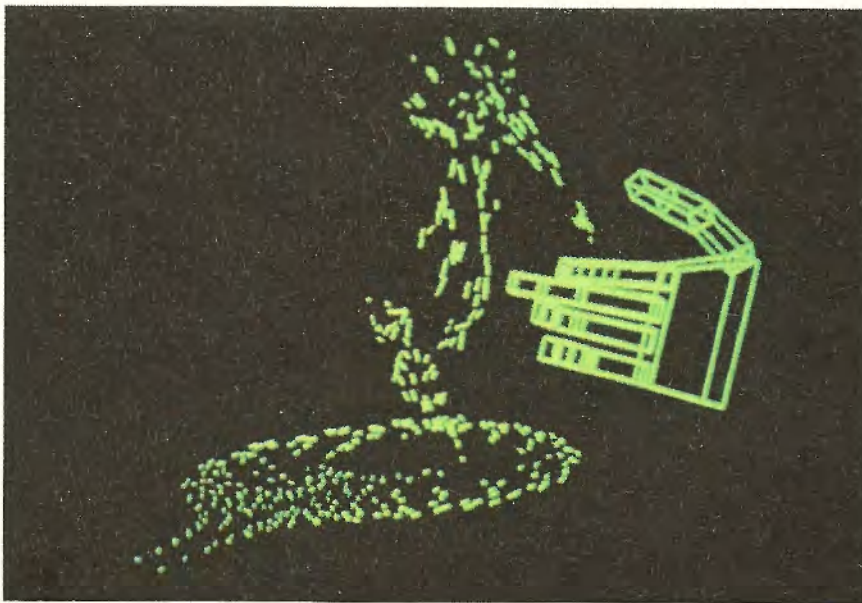
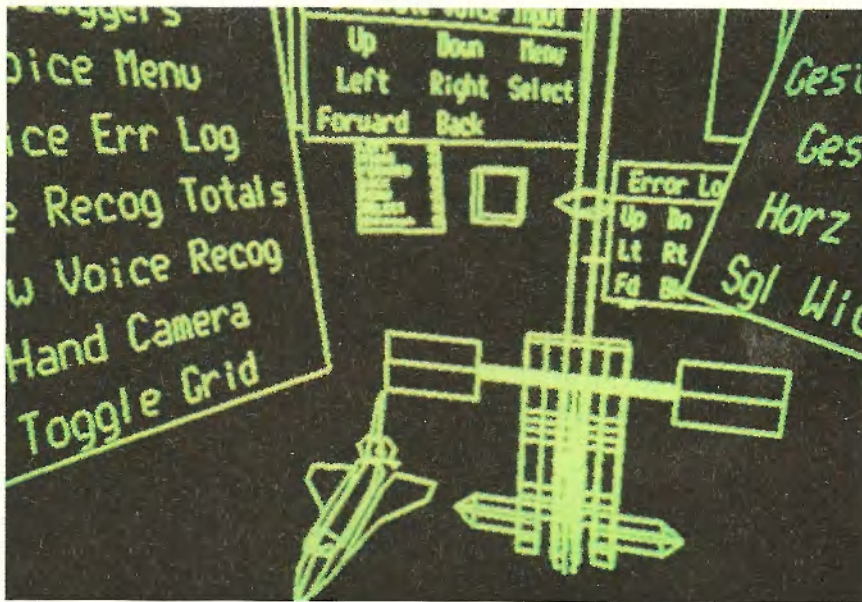
чения также уменьшается, хотя и не столь быстро. Методы максимизации эффективности компьютеров и минимизации используемой памяти в основном сложились, хотя и продолжают уточняться. Остается максимально увеличить производительность человека как пользователя.

Научные расчеты, например, потребовали особого внимания к быстродействию машины в силу того, что их вычислительные потребности очень велики. С появлением нового поколения суперкомпьютеров центр этого внимания, наконец, сможет переместиться. Сгау-2, в настоящее время один из быстрейших компьютеров в мире, может выполнять 1000 млн. операций с плавающей точкой в секунду (Мфлоп) (флоп — стандартная промышленная мера скорости вычислений; персональные компьютеры работают со скоростями от 1000 до 100 000 флоп). Очередное поколение компьютеров Сгау, которое, как ожидается, появится в будущем году, будет работать в 10 раз быстрее. Даже рабочие станции, которые обеспечивают графику для суперкомпьютеров, становятся мощнее: рабочая станция Stellar Computer Inc., выпуск которой ожидается в январе, будет действовать в диапазоне скоростей 50 Мфлоп.

Как эта дополнительная мощность может сделать взаимодействие между человеком и машиной более похожим на сотрудничество, нежели на конфронтацию? Ясно, что увеличение скорости вычислений есть благо само по себе, так как при этом уменьшается, а в некоторых случаях исключается период ожидания, в течение которого компьютер генерирует результаты. Менее ясно, как организовать более тесную связь между пользователем суперкомпьютера и процессом решения задачи.

В настоящее время использование типичного суперкомпьютера несколько напоминает консультацию у ораку-

УКРЕПЛЕННЫЙ НА ГОЛОВЕ МОНИТОР с датчиком положения и ориентации, перчатки, которые отслеживают движения кисти и пальцев, и электрический микрофон для распознавания речи переносят пользователя в созданную компьютером «реальность». Человек отдает распоряжения компьютеру, указывая, разговаривая, жестикулируя и даже управляя графическими изображениями. Сотрудники Эймского исследовательского центра Национального управления по авиации и исследованию космического пространства сконструировали несколько «искусственных реальностей» для использования в этой системе (см. рисунок на следующей странице).



ла машинного века. В течение подготовительного периода задача определяется, и ее параметры задаются на рабочей станции. Рабочая станция придает задаче форму, пригодную для суперкомпьютера; его последующие вычисления могут занять секунды, часы или дни. Во многих случаях пользователь не может прервать или изменить вычисления, раз уж они начались, а если из результатов вытекает необходимость проверки альтернативных параметров, «ритуал» должен быть повторен с самого начала.

Появление «искусственных реальностей», прототипы которых возникли в тренажерах для летчиков, в корне меняет характер общения человека с суперкомпьютером. «Искусственные реальности» позволяют человеку взаимодействовать с компьютером в интуитивном и точном формате, и увеличить число взаимодействий в единицу времени. Конечная цель исследований в области «искусственных реальностей» — создать модельную среду, которая будет казаться столь же «реальной», как и изображаемая ею действительность. Однако могущество интерфейсов может заключаться в их способности уводить за границу самой действительности посредством моделирования в конкретной форме абстрактных сущностей, таких, как математические уравнения, и предоставления человеку возможности преодолевать проблемы масштаба, манипулируя с равной легкостью и атомами, и галактиками.

У «ИСКУССТВЕННЫХ РЕАЛЬНОСТЕЙ» три составные части: образы, поведение и взаимодействие. Реалистичные зрительные образы помогают человеку воспринимать ин-

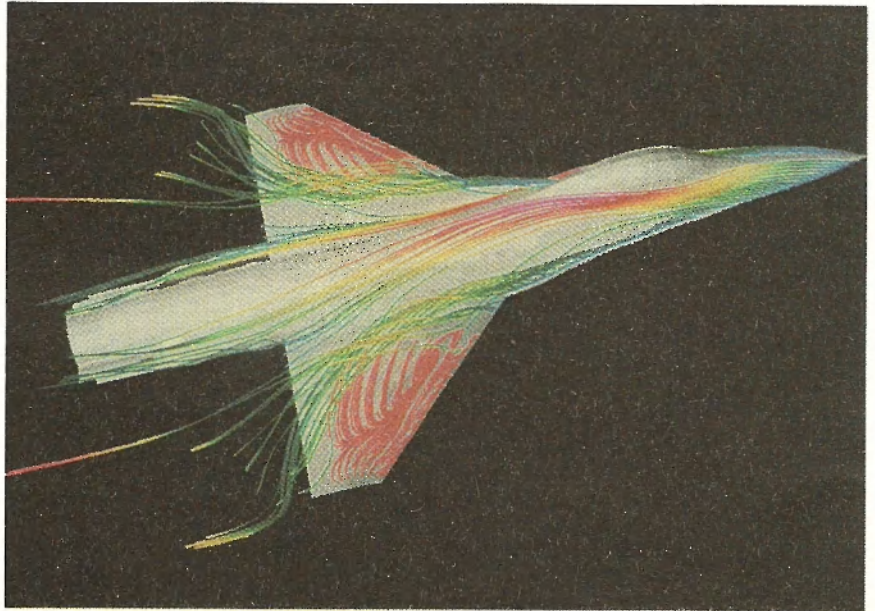
ГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, проецируемые внутрь показанного на предыдущем рисунке шлема, включают интерфейсное меню (вверху), модель воздушных потоков (в центре) и лабораторию, где размещена вычислительная система (внизу). Приведенные здесь фотографии не передают всей степени реальности изображений, в которых впечатление глубины сцены обеспечивается благодаря тому, что каждый глаз видит сцену под своим ракурсом; кроме того, человек может осмотреть созданную компьютером сцену поворачивая голову. Пользователь может выбрать что-либо подходящее из меню с помощью слова или жеста, повернуть модель воздушных потоков, чтобы посмотреть на нее из другой точки, протянуть руку и «потрогать» стены и столы лаборатории.

формацию, предоставляемую компьютером. Образы могут представлять реальные объекты, такие, как строительные конструкции, или абстракции, такие, как модели потоков жидкости. *Поведение* этих образов совпадает с поведением объектов или абстракций, которые они представляют. Моделирование поведения требует огромных затрат машинного времени, так как оно требует неоднократного решения систем из многих уравнений. Наконец, человек *взаимодействует* с «искусственной реальностью» во многом таким же образом, как он взаимодействует с трехмерным миром: двигаясь, указывая на предметы и выбирая их, разговаривая и наблюдая сцену с различных точек зрения.

Интерактивная компонента у «искусственных реальностей» отстает в развитии от других компонент. Освоенные промышленностью системы, позволяющие видеть объекты в трех измерениях и манипулировать их образами, все еще относительно примитивны. Какие виды интерактивных устройств смогут заполнить этот пробел?

Я начну с наиболее известной компоненты компьютерного интерфейса: дисплея. Типичная компьютерная рабочая станция оснащена 19-дюймовым (48 см) цветным монитором; рассматриваемый с расстояния полметра дисплей покрывает 37° зрительного поля по горизонтали и 28° по вертикали. В то же время поле зрения одного глаза в предположении, что голова зафиксирована, охватывает 180° по горизонтали и 150° по вертикали. Дисплеи, заполняющие зрительное поле, создают у наблюдателя ощущение, что он находится на месте действия, а не заглядывает извне: об этом свидетельствуют системы для широкоэкранный показа фильмов IMAX и OMNIMAX. Следовательно, увеличение числа компьютерных экранов могло бы помочь погрузить человека в «искусственную реальность».

Хотя большой дисплей заполняет большую часть поля зрения, он не будет показывать больше деталей, если число пикселей, или элементов изображения, останется у него таким же, как у малого. Пикселы — это отдельные световые точки, составляющие образ, который создается электронно-лучевой трубкой; они определяют разрешение изображения. Типичный монитор рабочей станции состоит из приблизительно 1 млн. пикселей, организованных в сетку размером 1280×1024 пикселей. При обычном расстоянии от человека до экрана каждый пиксел покрывает около $2'$



МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ, создаваемых реактивным истребителем F-16A, демонстрирует сложность современной суперкомпьютерной графики. Траектории воздушных струй и их отклонение от корпуса самолета обозначены цветными линиями: синий цвет означает небольшое отклонение, красный — значительное. Красные вихри на крыльях показывают области напряжений сдвига. Информация, которую дает это изображение, помогает инженерам проектировать самолет с меньшим сопротивлением и большей подъемной силой. Такие же совершенные изображения уже являются стандартными особенностями многих «искусственных реальностей».

зрительного поля; человеческий же глаз способен различать детали, имеющие размер до $1'$. Существует 20-дюймовый (50 см) квадратный цветной монитор, имеющий около 4 млн. пикселей в сетке 2000×2000 ; рассматриваемый с расстояния полметра каждый пиксел покрывает угол около $1,4'$. Монитор, который бы в полной мере соответствовал остроте человеческого зрения, пока не сконструирован.

Как еще можно повысить степень реальности при этих ограничениях? Одна из возможностей — дисплей, укрепляемый на голове. Этот дисплей может способствовать восприятию глубины во многом таким же образом, как в устройстве Vu-Master достигается стереоскопический эффект: оба глаза видят один и тот же объект, но его изображения несколько смещены относительно друг друга. Дополнительную информацию о глубине можно получить, используя явление двигательного параллакса, которое заключается в изменении воспринимаемой сцены при изменении положения наблюдателя, смотрящего в некоторую точку в пространстве. Этот эффект моделируется с помощью датчика, регистрирующего положение и ориентацию головы. Кроме того, поскольку датчик улавливает движения головы в целом, человек, поворачивая

голову, может наслаждаться иллюзией просмотра искусственной панорамы. Изображение, которое он видит, зависит от направления, в котором он смотрит.

В первом укрепляемом на голове дисплее, построенном А. Сазерлендом в 60-е годы, миниатюрные электронно-лучевые трубки играли роль дисплеев, а механические соединения передавали данные о положении и ориентации головы в компьютер. Сегодня легкие мониторы на жидких кристаллах и электронные датчики сделали реализацию этой идеи более практичной. Наиболее развитая система с такими приспособлениями не только создает «искусственные реальности», но и замещает одну реальность другой. В Эймском исследовательском центре Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) С. Фишер, М. Макгриви и Дж. Хамфрис сконструировали для использования на космических станциях шлем, который передает астронавту внутрь станции то, что «видит» робот, находящийся снаружи. Когда голова астронавта поворачивается, глазо-кинокамеры робота поворачиваются в том же направлении.

Электронный датчик, который регистрирует положение и ориентацию головы в описанной выше системе

НАСА, играет важную роль во многих других интерфейсных системах. Производимый отделением навигационных исследований корпорации McDonnell Douglas датчик Polhemus посылает электромагнитные импуль-

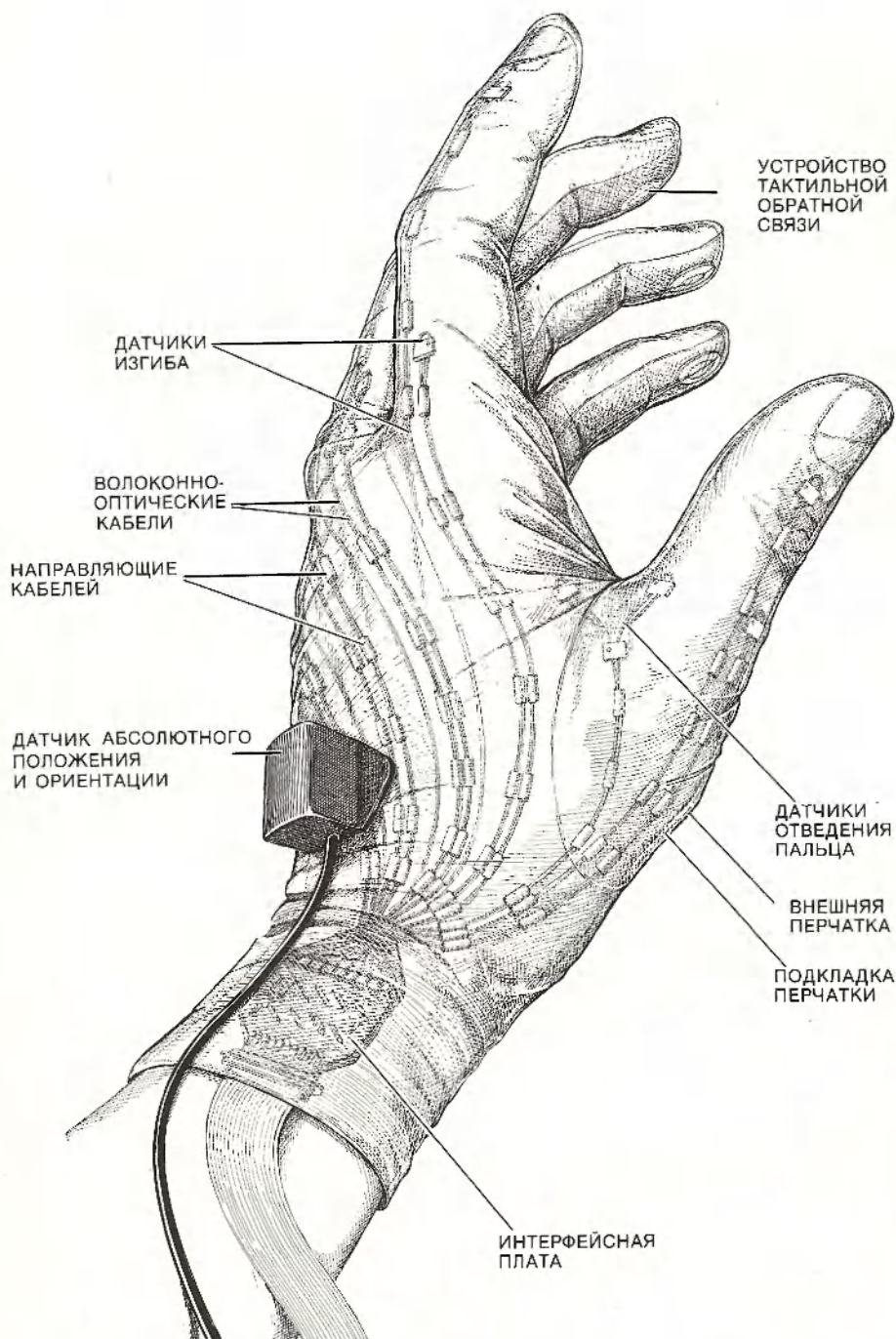
сы от трех передающих антенн к трем принимающим. Как в передающем, так и в приемном устройстве катушки антенн образуют друг с другом прямые углы, формируя декартову систему координат.

Передатчик представляет собой коробочку со стороной около 5 см и должен размещаться не более чем в 1,5 м от приемника. Он испускает три импульса один за другим, по одному из каждой антенны. Импульсы индуцируют ток в катушках приемника — кубика со стороной около 2 см, который размещается на отслеживаемом объекте. Сила тока зависит как от расстояния между приемником и передатчиком, так и от относительной ориентации антенн приемника и передатчика. Компьютер вычисляет положение приемника в пространстве исходя из девяти значений силы тока, возникшего после трех последовательных импульсов. Три импульса повторяются лишь около 40 раз в секунду, поэтому результирующее изображение движется несколько неустойчиво; имитация плавного движения, вероятно, останется невозможной до тех пор, пока датчик не сможет выдавать 60 импульсных триплетов в секунду.

Установленный в шлеме НАСА датчик Polhemus вполне мог бы определять направление человеческого взгляда, если бы не одно «но»: глаза могут двигаться — и зачастую движутся — независимо от головы. Чтобы преодолеть эту трудность, инженеры изучают методы, заимствованные из экспериментальной психологии. Психологи уже давно используют устройства, называемые датчиками движения глаза, для сбора данных о том, как люди читают и рассматривают рисунки. Указанные датчики отражают луч света от роговицы глаза. Направление, в котором отражается свет, определяет точку фиксации — иными словами, место, куда смотрит человек.

Датчики движения глаза все еще являются новинкой для специалистов по компьютерам. Прикрепляемые к очкам датчики можно приобрести за несколько тысяч долларов, но они не очень точны. Более совершенная система проецирует луч инфракрасного света на роговицу и ловит его отражение с помощью широкоугольной телекамеры, расположенной примерно в полутора метрах от человека. Камера остается нацеленной на глаз даже при значительных движениях головы, если движение не слишком быстрое; например, ее может поставить в тупик чихание.

ЭКРАНЫ во всю стену, закрепленные на голове дисплеи, датчики положения головы и движения глаза увеличивают степень правдоподобия «искусственной реальности» путем расширения поля зрения и большей детализации в точке фиксации. Дис-



ИНТЕРФЕЙС-ПЕРЧАТКА DataGlove, сконструированный фирмой VPL Research, Inc., преобразует данные о движении руки и пальцев в электрические сигналы. Между двумя слоями ткани находятся волоконно-оптические кабели, которые проходят вдоль каждого пальца туда и назад; их концы заключены в интерфейсную плату на запястье. На одном конце каждого кабеля находится световылучающий диод, а на другом фототранзистор. Кабели обработаны таким образом, что при согнутом пальце часть света уходит наружу; фототранзистор преобразует падающий на него свет в электрический сигнал. Датчик положения и ориентации изготовлен отделением навигационных исследований корпорации McDonnell Douglas.

плеи могут давать действительные изображения, как шлем НАСА для космических станций, или искусственные образы, генерируемые суперкомпьютером. Как человек будет взаимодействовать с такими изображениями?

Работа наиболее распространенных устройств взаимодействия ограничена двумя измерениями. Даже при трехмерном компьютерном моделировании управление ведется с помощью двумерного средства: «мышь» или рычага («джойстика»). Еще менее совершенны наборные диски, которые управляют каждой из трех осей по отдельности. Предположим, что может быть создано устройство взаимодействия, обладающее точностью, послушностью и подвижностью человеческой руки. Такое «устройство» в действительности существует; оно называется DataGlove и состоит из самой руки, вооруженной датчиком Polhemus и специальной перчаткой, которая регистрирует движения кисти и пальцев.

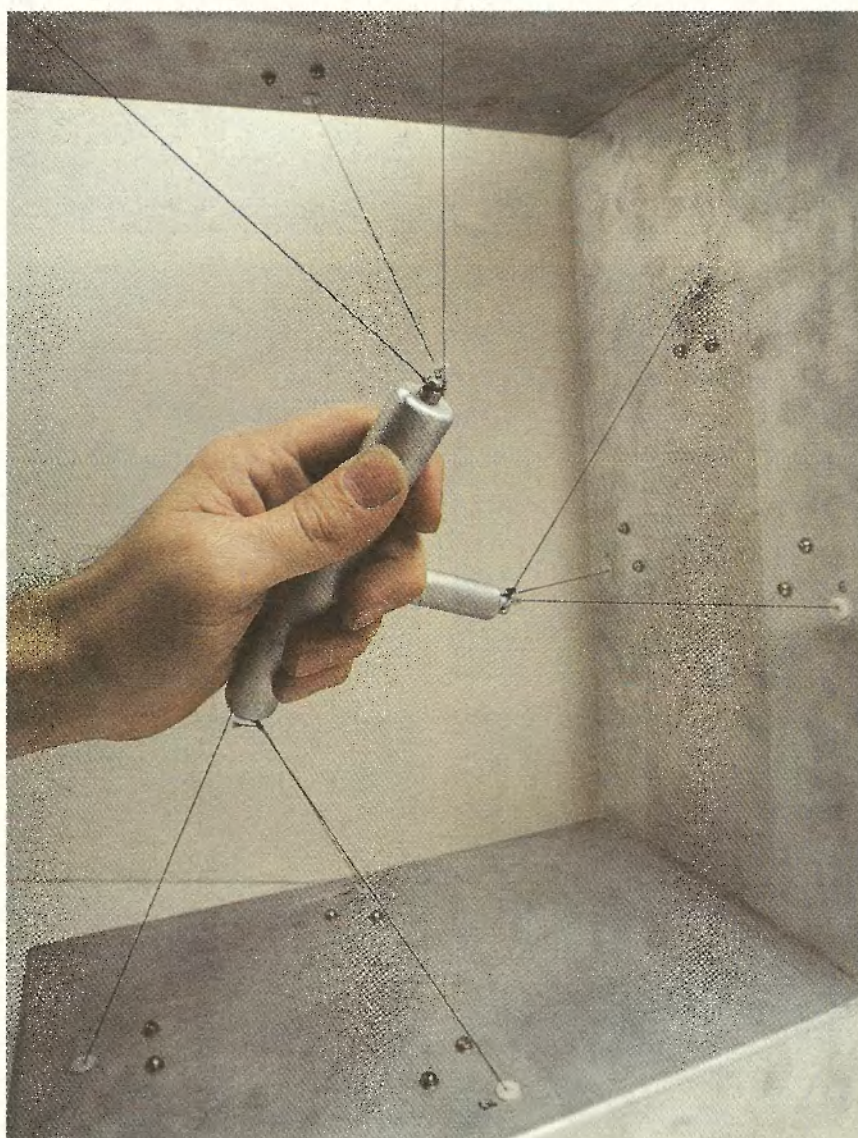
Устройство DataGlove было разработано за последние три года Т. Циммерманном и Л. Харвиллом из небольшой калифорнийской компании VPL Research, Inc. Кабели из оптического волокна, заключенные между двумя слоями ткани, проходят вдоль каждого пальца. Оба конца каждого кабеля закреплены в интерфейсной плате на запястье. Светодиод, расположенный на одном конце, посылает свет по кабелю к фототранзистору, находящемуся на другом конце. Фототранзистор преобразует свет в электрический сигнал, который может распознать компьютер; сигнал передается с запястья на терминал по электрическому проводу. Хотя обычные волоконно-оптические кабели передают свет, будучи изогнуты, кабели в DataGlove обработаны в местах сгиба пальцев так, что при согнутом пальце или при раздвигании и сдвигании пальцев свет частично уходит наружу. Чем значительнее перемещение, тем больше света теряется.

Соединенная с датчиком Polhemus, укрепленном на тыльной стороне руки, DataGlove сулит огромные возможности. Группа Фишера в Эймском центре использует эту перчатку в соединении со шлемом для космических станций; в НАСА надеются, что когда-нибудь робот сможет выполнять сложные маневры и ремонтные работы вне станции, повторяя движения руки астронавта, находящегося внутри станции. Фирма VPL использует принципы DataGlove в системе DataSuit, которая должна охватывать все человеческое тело.

СТОЛЬ сложный интерфейс, как в DataGlove, возможно, не нужен для всех классов задач, но со многими задачами, которые хотят решать на суперкомпьютерах, легче иметь дело непосредственно, не вводя команды с клавиатуры. Кроме того, «искусственные реальности» могут добавить тактильный элемент в системы, которые обычно «пощупать» нельзя. Представим себе биохимика, анализирующего две молекулы: фермент и субстрат, с которым этот фермент связывается. Биохимик знает структуру и фермента, и субстрата (причем обе молекулы показаны на компьютерном мониторе) и хочет выяснить, какая часть фермента с какой частью

субстрата взаимодействует. Вооруженный устройством DataGlove, он может манипулировать обеими молекулами, как двумя кусками разрезной головоломки, чтобы посмотреть, какие части подходят друг к другу.

Теперь представьте себе, что вы можете почувствовать форму молекулы фермента: ее впадины и выступы, гладкие края и острые углы. Представьте, что вы ощупываете пальцем активный центр фермента, который проявляет сильное химическое сродство к субстрату. Представьте, что вы ощущаете движение субстрата в направлении к активному центру и притяжение, обусловленное межмолекулярными силами. Для того чтобы



ДЖОЙСТРИНГ — одно из самых эффективных устройств с силовой обратной связью. Изобретенный Р. Фелдманом из Национальных институтов здоровья прибор передает в компьютер данные о положении руки, сжимающей подвешенную Т-образную конструкцию; компьютер в свою очередь управляет сервомоторами и создает усилия, изменяя натяжение девяти проводов, соединенных с Т-образной конструкцией.

достигнуть этих эффектов, инженеры изучают методы создания тактильной и силовой обратной связи.

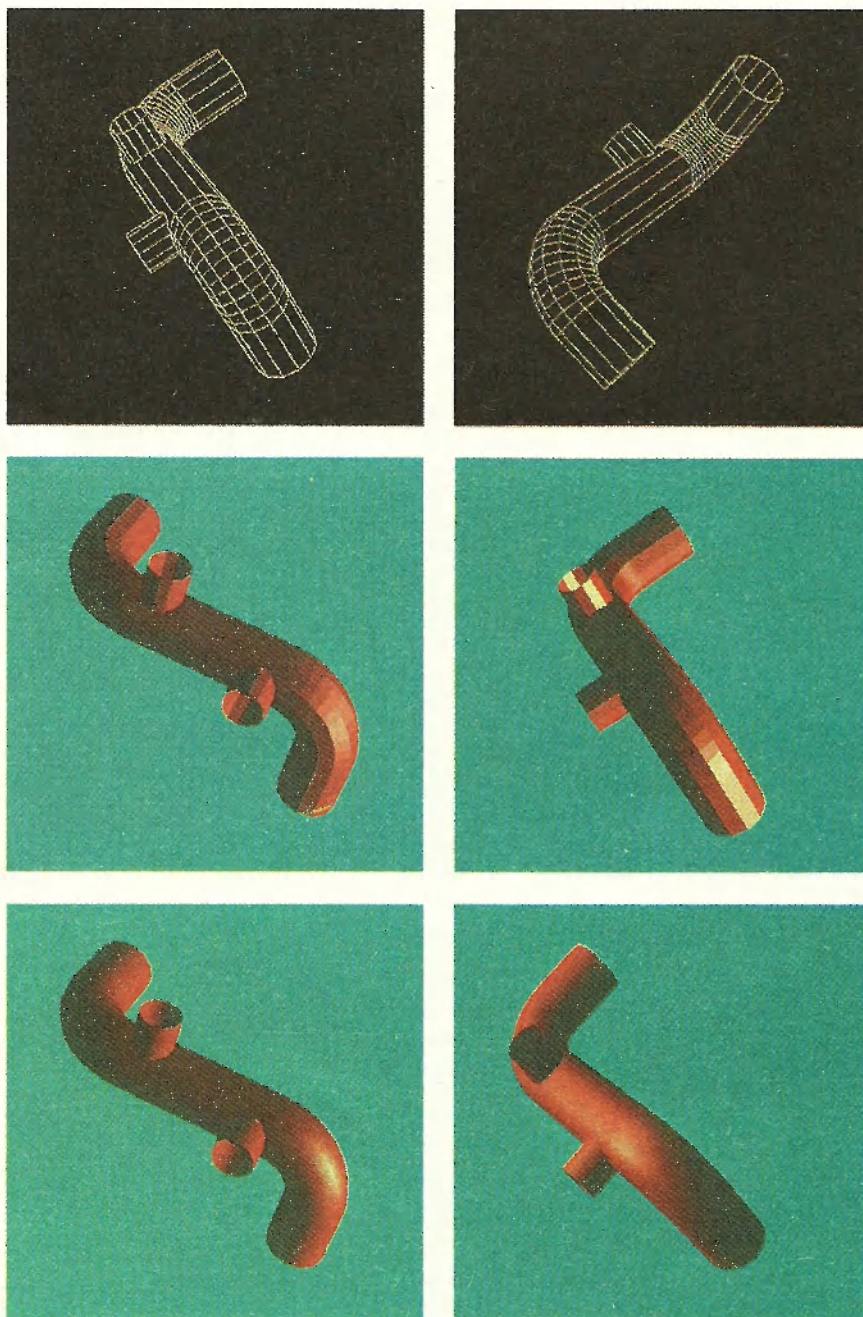
Испытываются три варианта тактильной обратной связи, которые могли бы быть включены в систему DataGlove. Прототипом одного решения является устройство с тактильной обратной связью для слепых, в котором маленькие соленоиды прижима-

ют тупые штырьки к коже. Однако эти раздражители слишком велики; каждый толщиной около 8 мм. В соединении с перчаткой могут быть также применены пьезоэлектрические кристаллы. Кристаллы вибрируют под действием электрического тока, и мозг рассматривает их вибрацию как тактильное ощущение. Третий подход использует недавно появившиеся

«металлы с памятью», которые меняют форму в зависимости от температуры. Небольшие изолированные кусочки такого металла могут быть сориентированы так, чтобы давить на кожу при их нагревании электрическим током.

Силовые ощущения труднее передать через «перчатку», чем тактильные ощущения, хотя металлы с памятью обещают кое-что и здесь. Еще в 1968 г. группа исследователей, руководимая Ф. Бруксом-младшим из Северо-Каролинского университета в Чейпел-Хилле, приспособила для силовой обратной связи дистанционный манипулятор типа используемых для работы с радиоактивными материалами. Сегодня наиболее эффективной системой силовой обратной связи является «джойстринг», сконструированный Р. Фелдманом из Национальных институтов здоровья. Названный так по аналогии со своим предшественником «джойстиком» «джойстринг» Фелдмана — просто жесткая Т-образная конструкция около 8 см длиной, соединенная каждым концом с тремя туго натянутыми проводами. Провода в свою очередь соединены с шифраторами углового положения и сервомоторами. Человек берет за «джойстринг» и манипулирует им, а компьютер считывает информацию о движении человеческой руки, передаваемую шифраторами углового положения, и генерирует силовую обратную связь с помощью сервомоторов.

Кроме «джойстринга» существует лишь горстка устройств с силовой обратной связью; каждое из них уникально. Эти системы ограничены специализированными применениями в научных лабораториях. Простейшие конструкции могут реагировать на приложенную силу, но не могут создавать силовую обратную связь. В Университете Джорджа Вашингтона мой коллега Дж. Сиберт и его группа обнаружили новое применение подобной системы с силовым входом. Они изобрели систему, которую можно назвать автоматической кистью и которая основана на выпускаемом промышленностью планшете для ввода данных, «ошущающем» не только положение пера, но и его ориентацию и приложенную к нему силу. Компьютер использует эту информацию, чтобы моделировать поведение кисти художника. Когда давление увеличивается, «кисть» расширяется, а ширина рисуемой линии меняется с изменением ориентации пера. «Искусственная реальность» Сиберта не только моделирует до некоторой степени традиционные инструменты художника, но и создает такие художественные



ИЗОБРАЖЕНИЯ ТРУБОК помогли автору понять, как влияет степень реальности изображений на производительность человека. Испытуемым предъявляли одновременно два изображения; затем их спрашивали, является ли одно изображение поворотом другого. Автор обнаружил, что цветные подсвеченные трубки (в центре) испытуемые сравнивали примерно на 20% быстрее, чем схематичные фигуры (вверху), однако дальнейшее совершенствование расцветки (внизу) не приводило к существенному улучшению результатов сравнения.

средства, которые до сих пор не существовали.

Как еще человек хотел бы взаимодействовать с суперкомпьютером? Во многих случаях разговор или жестикация при общении с компьютером могут быть уместнее или удобнее, чем несловесные манипуляции с символическими образами. Системы распознавания речи и системы распознавания жестов развиты лучше других составляющих «искусственных реальностей». Более 10 лет назад Н. Негропonte и Р. Болт из Массачусетского технологического института продемонстрировали возможность распознавания речи при взаимодействии с компьютером. Сегодня машины со словарем в несколько сот слов — это обычные помощники в работах, требующих использования обеих рук, таких, например, как тестирование электронных устройств.

Методы распознавания речи все еще отсутствуют в большинстве компьютерных систем, предназначенных для решения задач. Такое прискорбное промедление в освоении новой техники случилось в прошлом: «мышь», разработанная в конце 60-х годов, не производилась промышленностью до начала 80-х годов. Тем временем системы распознавания речи усложняются. К. Дейвис из Исследовательского центра Томаса Уотсона корпорации IBM недавно показывал мне экспериментальную систему со словарем в 20 тыс. слов, что составляет 98% типичного английского разговорного словаря. Машина понимает даже семантически трудные фразы типа: «Write Ms. Wright a letter right away»*. Специалисты из IBM надеются сделать свою систему доступной в ближайшие годы.

Разработка методов для распознавания жестов буксует на протяжении нескольких лет из-за определенных трудностей, ждущих своего решения. Системы нужно научить исключать неясности из цепочки жестов и различать, когда кончается одна команда и начинается другая. Дж. Райн из Исследовательского центра Томаса Уотсона сконструировал систему, которая распознает жесты, если рука движется в плоскости и держит позиционирующее устройство, напоминающее перо. Опирируя, например, с электронными бланками, человек может сложить две группы чисел, об-

ведя каждую из групп на планшете и изображив знак сложения. Компьютер введет сумму в позицию таблицы, указанную знаком сложения. Хотя этот подход находится еще в младенческом возрасте, я предвижу день, когда биохимик, надев перчатки DataGlove, укажет на молекулярные структуры, изображенные на экране дисплея суперкомпьютера, и произнесет: «Фенилаланин-221 на этой спирали [показывает] не взаимодействует должным образом с этим [обводит] глутамином-57. Заменяй его на гистидин».

«Искусственные реальности» успешно развиваются. На самом деле один из наиболее трудных оставшихся барьеров — это объединение уже созданных методов и средств. Как только этот барьер будет взят, сами приспособления потребуют относительно небольших капиталовложений; устройство DataGlove, например, стоит около 8000 долл. Усилия исследователей и программистов, затрачиваемые в настоящее время на разработку перспективных интерфейсов, будут, вероятно, наиболее дорогостоящей стороной их реализации. Будут ли выгоды от «искусственных реальностей» оправдывать их стоимость?

Интуитивно кажется, что система, вовлекающая человека в диалог и представляющая информацию в легкодоступной форме, будет намного «резвее», поучительнее и легче для освоения, чем традиционные интерфейсы. Предчувствие такого рода очень трудно обосновать. Будет ли специалист по сопротивлению материалов понимать распределение напряжений лучше, если он сможет «прикладывать» нагрузки с помощью собственных рук? Станут ли молекулярные взаимодействия яснее, если межмолекулярные силы можно будет в буквальном смысле почувствовать? И насколько «реальными» должны быть «искусственные реальности», чтобы оправдать свое предназначение?

Некоторое время назад я начал интересоваться последним вопросом применительно к зрительной образности. Работая с моим коллегой В. Барфилдом и группой аспирантов, возглавляемой Дж. Сандфордом, я экспериментально исследовал, как влияет возрастание степени реальности на скорость, с которой пользователи компьютера выполняют простые мысленные манипуляции с двумя изображениями. Задача, называемая мысленным вращением, обычно предлагается в опытах психологов-экспериментаторов, изучающих, как

человек представляет себе окружающее. Мы предъявляли испытуемым одновременно два различных изображения трубчатой структуры и предлагали решить, является ли одно поворотом другого. В одних тестах изображения были весьма схематичными, в других показывались цветные изображения с учетом освещения, в третьих эти изображения были уже гладко раскрашены. Мы обнаружили, что испытуемые анализируют цветные изображения примерно на 20% быстрее, чем контурные фигуры, но что более совершенная раскраска не уменьшала время сравнения. Следовательно, иногда может существовать предел, дальше которого «искусственные реальности» нет смысла совершенствовать.

Что касается вопросов об окончательной оценке «искусственных реальностей», то ответы на них еще ждут своего часа. Почти 20 лет назад аспирант Брукса Дж. Баттер заметил, что некоторые студенты, изучая графические изображения двумерного силового поля, лучше понимали затрагиваемые понятия, если они могли не только видеть векторы силы, но и «чувствовать» их. Работа Баттера, который использовал простое двумерное устройство с силовой обратной связью, является наиболее свежим примером исследования, оценивающего значение «искусственных реальностей». Наряду с моими экспериментами в Университете Джорджа Вашингтона оно иллюстрирует тип исследований, необходимых для того, чтобы определить, являются ли надежды, рождаемые «искусственными реальностями», чем-то большим, нежели иллюзией.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Если вы не успели подписаться на журнал «В МИРЕ НАУКИ» на 1988 г., вы можете оформить подписку на II—IV кварталы в любом отделении «Союзпечати» до 1 марта 1988 г. Стоимость подписки на квартал — 6 р. Индекс 91310.



* Здесь источником неоднозначности является омофония (разные слова произносятся одинаково, хотя и различаются по написанию). В русском языке близким примером может служить фраза: «Сенька Косой увидел косой парус рядом с песчаной косой». — *Прим. перев.*

Компьютерные сети

Компьютеры, объединенные в сеть, могут «общаться» и совместно пользоваться программами, данными и дорогостоящим аппаратным обеспечением. Для создания такой сети одних физических каналов связи недостаточно — компьютеры должны понимать друг друга

РОБЕРТ Е. КАН

ЗАЧЕМ компьютеры объединять в сети? Зачем людям разговаривать? Ответы на эти вопросы аналогичны: чтобы пользоваться общей информацией, вызывать какие-либо действия или события и вообще чтобы сотрудничать в той или иной форме. Об усилиях, затрачиваемых на создание интеллектуальных компьютеров, способных мыслить подобно человеку, написано немало. Однако еще раз подчеркнем, что интеллектуальное поведение — дело не исключительно индивидуальное. В значительной степени оно базируется на общении: на «паутине» взаимодействий, продолжительных и кратких, которые человеческое существо поддерживает с себе подобными. Наука о компьютерных сетях решает задачу, как научить компьютеры общаться, и это является столь же важным, как и задача научить их мыслить.

В сетевой проблеме два существенных аспекта. Во-первых, соединение компьютеров линиями электронной связи, по которым можно было бы передавать информацию без искажений и помех. Во-вторых, создание общего языка, такого, чтобы компьютеры, «разговаривая» на нем по линии связи, могли понимать друг друга.

Ниже мы остановимся на обоих аспектах, однако начать придется с некоторых определений. Существует много типов сетей. Один из них — это компьютеризованные системы резервирования мест на авиалиниях. Система SABRE, внедренная американской фирмой American Airlines, была одним из первых примеров взаимодействия компьютеров по телефонным линиям. Другой пример одной из первых сетей — система раннего обнаружения ПВО. Обе эти сети являются узкоспециализированными системами, в которых прямое взаимодействие между пользователями незначительно. (Косвенное взаимо-

действие в системе резервирования мест происходит, например, из-за ограниченности числа мест на самолетах.) Мы же рассмотрим такие сети, в которых много пользователей и машин различного назначения взаимодействуют непосредственно и интенсивно. Несмотря на гигантский прогресс в разработке таких систем за прошедшее десятилетие, эта область все еще находится на ранней стадии своего развития.

Объединение компьютеров в сеть еще не гарантирует того, что они смогут выполнять какую-то задачу, так же как наличие международной телефонной связи недостаточно для осмысленного общения людей. Компьютеры должны понимать друг друга. Не удивительно (и это в равной мере относится к средствам общения людей), что эту проблему решать тем труднее, чем больше различия в аппаратуре и программном обеспечении.

Взаимодействия в компьютерных сетях не ограничиваются обменом обычными данными и программами. Например, можно оцифровывать данные, введенные голосом, и запоминать их для последующего поиска или передачи. Сеть можно снабдить системой распознавания речи для выполнения функций управления или для ввода программ. Во многих случаях возможен вывод информации через речевые синтезаторы. В компьютер может вводиться факсимильная информация для объединения с другими документами или для передачи, хранения и обработки. Вывод и видеовывод, графическая информация и синтезируемые в машинах изображения также могут быть элементами сетевого общения.

НАЧАЛО компьютерным сетям положили разработки первых машин с разделением времени в нача-

ле 60-х годов, когда компьютер был дорогостоящим и дефицитным ресурсом. В основе разделения времени лежит простая идея. Поскольку выполнение многих задач, особенно разработка и отладка программ, требуют лишь небольшой части ресурсов большого компьютера, экономически целесообразно, чтобы компьютер одновременно обслуживал не одного, а многих пользователей. Этого можно добиться, переключаясь с одной пользовательской программы на другую каждые несколько миллисекунд. Переключениями, а также работой различных устройств (дисков, принтеров и т. п.) управляет программа, называемая операционной системой; она же распределяет и все машинные ресурсы.

Переход от систем разделения времени к компьютерным сетям не потребовал больших интеллектуальных усилий. Если относительно небольшая группа пользователей может разделять один компьютер, то, естественно, привлекательной оказалась идея, а нельзя ли большему числу пользователей обращаться к ресурсам — базам данных и даже специализированным программам, — имеющимся на нескольких компьютерах, работающих с разделением времени. С намерением осуществить эту идею Управление перспективных исследований министерства обороны США (Advanced Research Project Agency of the U.S. Department of Defence — ARPA, в настоящее время известное как DARPA) начало в 1969 г. объединять научно-исследовательские центры страны в компьютерную сеть, получившую название ARPANET. Примерно в то же время фирма Tymshare пришла к выводу об экономической целесообразности создания сети для диалогового взаимодействия удаленных терминалов с компьютерами, работающими с разделением времени.

Для обеспечения связи между компьютерами подходила телефонная сеть (она уже широко применялась для подключения к компьютерам удаленных терминалов), и телефонными компаниями были предоставлены выделенные линии, позволившие создать компьютерные сети, охватывающие большие территории.

Сеть ARPANET, первая территориально распределенная сеть с диалоговым взаимодействием компьютеров, была построена фирмой Bolt, Beranek and Newman, Inc. При ее создании пришлось преодолеть множество технических трудностей, наиболее существенные из которых были связаны с обеспечением широкополосности связи и быстрой коммутации. В телефонных сетях используется принцип коммутации цепей: каждый разговор на время резервирует некоторую часть сети, отводимую ему переключающим устройством. При этом два абонента как бы соединены напрямую одной цепью. Проблема в данном случае заключается в том, что на установление соединения затрачивается время, измеряемое секундами (в этом всякий раз убеждаешься, когда приходится звонить по междугородной линии). Для обычных разговоров между людьми эта задержка незначительна, но она неприемлема при быстрых обменах

данными между компьютерами. В быстрых коммутируемых сетях задержку можно уменьшать до долей секунды, т. е. до уровня, вполне приемлемого для многих приложений.

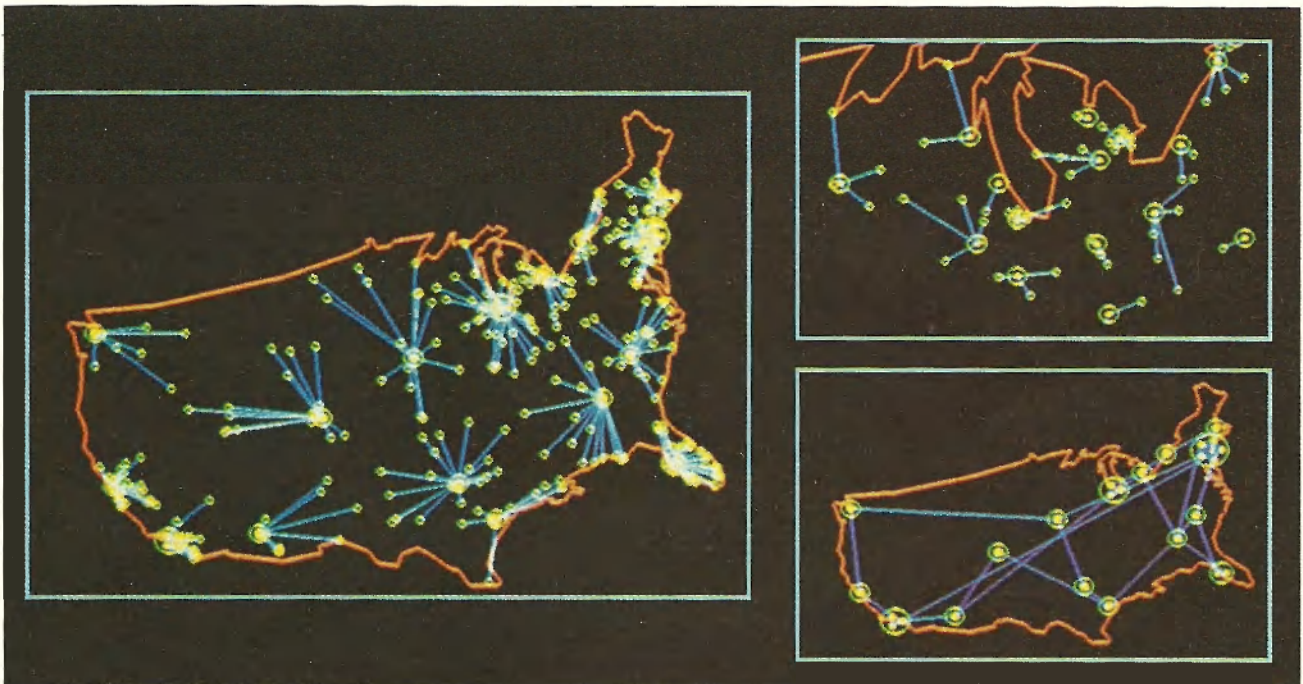
Резервирование цепей, однако, зачастую оказывается расточительством. Если бы такой принцип коммутации применялся, например, к шоссеному движению и вам нужно было бы проехать из Нью-Йорка в Вашингтон, то вы должны были бы попросить «шоссеиную систему» зарезервировать одну полосу на всем протяжении шоссе № 95 и закрыть ее для всех остальных машин. В результате все шоссе оказались бы зарезервированными и практически пустыми.

РЕШЕНИЕ указанной проблемы дает метод, примененный впервые в сети ARPANET и названный коммутацией пакетов. При коммутации пакетов информация, посылаемая одним компьютером другому, не передается в виде неразрывного потока по отведенной для нее цепи. Вместо этого компьютер каждого пользователя подключается к узлу (в первоначальном варианте сети ARPANET его функции выполнял мини-компьютер), который делит поступившие от компьютера сообщения на последовательность пакетов данных.

Сообщение состоит из произволь-

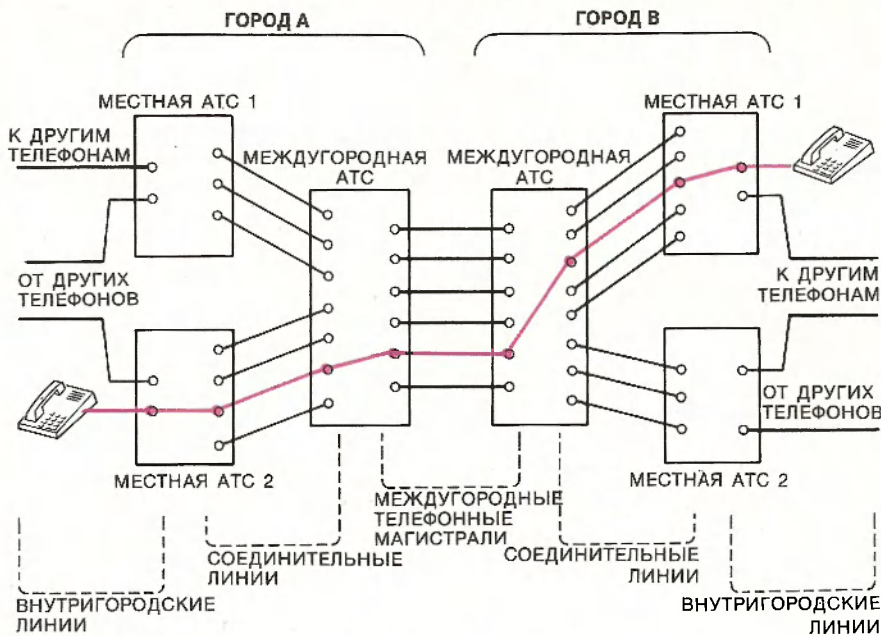
ной последовательности двоичных цифр, которой предшествует некоторая ограниченная по длине адресная информация. Каждый пакет снабжается «заголовком», содержащим как минимум адрес назначения и порядковый номер пакета, после чего пакет отправляется в сеть. Сеть действует как быстродействующий вариант почты, которая считывает адреса и доставляет пакеты за доли секунды. При этом нет задержек из-за коммутации цепей, поскольку таковая отсутствует. Как следствие также нет и избыточности пропускной способности, поскольку нет отдельного соединения между двумя компьютерами. Небольшая часть пропускной способности, однако, расходуется на маршрутную информацию, заголовки и другую управляющую информацию.

Последовательные пакеты одного и того же сообщения могут попасть в точку назначения разными путями. Кратчайший маршрут по сети определяется совместно узлами в соответствии с распределенным алгоритмом маршрутизации. В каждом узле оцениваются расстояния в некоторой «метрике» до всех точек назначения в сети с учетом повреждения линий, загруженности узлов и т. п. Оценки часто подновляются (например, каждые полсекунды) и передаются соседним узлам. Располагая этой информа-



ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ в стадии проектирования. На разных картах изображено несколько уровней (слоев) системы. На большой карте показаны главные компьютеры и сборщики/разборщики пакетов (PAD), подключенные к узлам, называемым коммутаторами пак-

етов. На карте района Великих озер показаны отдельные терминалы, подключенные к PAD. На маленькой карте США показаны каналы дальней связи между узлами коммутации пакетов. Изображения получены на экспертной системе DESIGNet фирмы BBN Communication.



КОММУТАЦИЯ ЦЕПЕЙ в междугородной телефонной сети. Соединение (выделено цветом) пары абонентов обеспечивают телефонные станции. Эта часть сети резервируется на время разговора.

цией, узел может направить каждый прибывший пакет на следующий этап его путешествия. Первоначальный алгоритм маршрутизации в сети ARPANET не учитывал топологии и состояния всей сети. Сейчас информация о топологии распространяется по всем узлам.

Когда обмен информацией происходит короткими порциями (например, когда оператор за терминалом набирает команды для удаленного большого компьютера), коммутация пакетов может привести к более эффективному использованию пропускной способности. Поскольку никакая пропускная способность специально не резервируется за индивидуальным пользователем, временные промежутки между пакетами могут заполняться пакетами других пользователей, следующими в ту же или другие точки назначения. Фактически коммутация пакетов представляет собой разновидность распределенной системы мультиплексирования, дающей возможность всем пользователям коллективно и непрерывно использовать все линии сети.

ДЛЯ ТОГО чтобы связать между собой n узлов в сети с пакетной коммутацией, как минимум нужна $n - 1$ линия; если концевые узлы соединить еще одной дополнительной линией, получится сеть с простой кольцевой топологией. Кольцо желательно дополнить некоторыми поперечными связями, чтобы отказ одного узла или линии меньше сказывался

на работе сети. Можно построить очень надежную сеть с числом линий, лишь незначительно превышающем число узлов. Отказ той или иной линии в сети не обязательно приводит к нарушению связи между парой абонентов (что неизбежно в сети с коммутацией цепей), поскольку пакеты можно направить по другому пути. Конечно, сеть должна быть спроектирована так, чтобы в ней не возникали или быстро ликвидировались любые «транспортные пробки».

Так как пакеты могут следовать по разным маршрутам, порядок их прибытия может отличаться от порядка отправления. Поскольку для некоторых приложений это недопустимо, узел назначения выстраивает относящиеся к нему пакеты в правильном порядке. В этом случае компьютер-получатель вообще не замечает того, что сообщение разбивалось на пакеты. Компьютер-отправитель также ничего не знает о применяемой в сети технике коммутации — он лишь представляет адрес назначения в начале сообщения, а первый же узел коммутации пакетов снабдит адресами каждый пакет сообщения. С точки зрения пользователя, все выглядит так, как будто ему выделена обычная цепь, поэтому говорят, что сеть в качестве услуги предоставляет «виртуальную цепь».

Идея «виртуальной цепи» уходит корнями в телефонию. И тем не менее для некоторых приложений абоненты сети были бы столь же, если не более, довольны, предоставь им эквивалент

почтового, а не телефонного обслуживания. Например, если от одного компьютера к другому передается изображение и данные разбиваются на пакеты, то порядок поступления пакетов не существен — важно, чтобы они прибыли все и принесли информацию, достаточную для «сборки» всего изображения. В этом случае можно было бы передавать по сети однопакетные «дейтаграммы» — аналогично пересылке писем по почте с той лишь разницей, что дейтаграммы доставляются за несколько миллисекунд, а не за несколько дней.

После того как эффективность пакетной коммутации для территориально распределенных компьютерных сетей была продемонстрирована на примере сети ARPANET, в США было создано несколько коммерческих сетей с пакетной коммутацией (в частности, сеть Telenet фирмы Sprint и сеть TYMNET фирмы McDonnell Douglas). Множество таких сетей появилось и в других странах (например, сеть P.S.S. в Великобритании). Все они представляют собой общедоступные службы и работают по коммерческим выделенным линиям связи (сетевые компании устанавливают свои коммутаторы пакетов). Большинство территориально распределенных сетей предлагают в качестве услуги виртуальные цепи.

КОНСТРУКЦИЯ сети связи зависит от расстояний между связываемыми устройствами, типа этих устройств, а также от характера выполняемых задач. В случае когда два или большее число узлов расположены относительно близко в качестве среды передачи, как правило, применяются быстродействующая шина или локальная сеть. В территориально распределенных сетях среда передачи обычно состоит из многих звеньев связи в совокупности с соответствующими средствами коммутации.

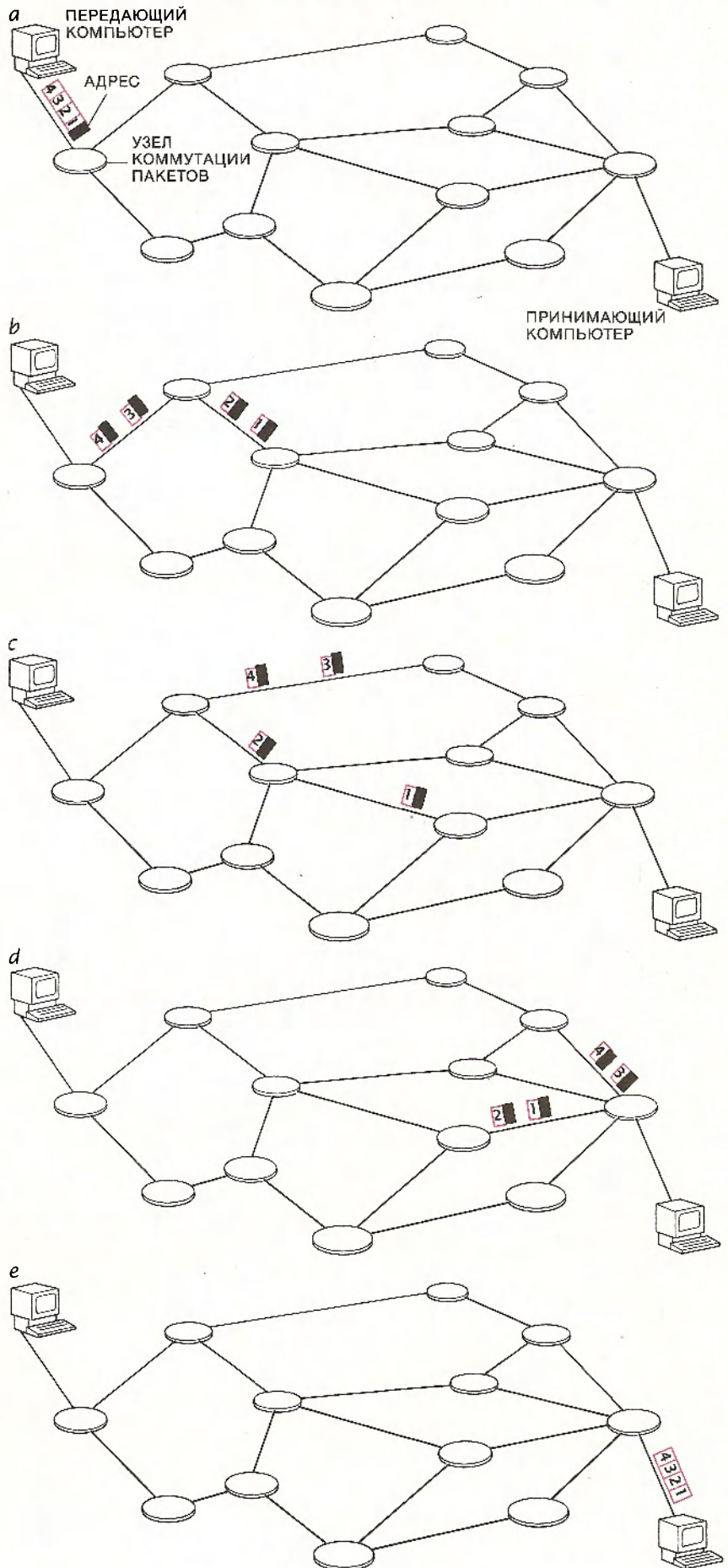
Наиболее распространенными в последнее время стали локальные сети. С их помощью объединяются два или большее число компьютеров, расположенных обычно в одном здании или группе зданий на территории одной организации. Они не только дают возможность сотрудникам организации обмениваться информацией и иметь доступ к одним и тем же базам данных и программам (как и в случае территориально распределенных сетей), но также позволяют различным рабочим станциям использовать в режиме разделения времени такое дорогое оборудование, как запоминающие устройства большой емкости и принтеры, цены на которые снижаются не так быстро, как на сами компьютеры.

Число уже существующих в мире локальных сетей оценивается в несколько сот тысяч. Эти сети, применяющие в качестве среды передачи коаксиальный кабель или скрученную пару проводов, как правило, предлагают и такую услугу, как доставка дейтаграмм. При необходимости перепорядочивание дейтаграмм осуществляет принимающий компьютер.

Наибольшее распространение получили локальные сети двух топологий: древовидные (самый известный пример — сеть Ethernet фирмы Xerox Corporation) и кольцевые (например, поставляемое фирмой IBM Corporation маркерное кольцо). Обе они представляют собой пакетные сети. Сеть Ethernet состоит из одного канала, образованного обычно коаксиальным кабелем, к которому подключены компьютеры, принтеры и другие устройства. Каждое устройство подсоединяется к кабелю при помощи интерфейсного блока, являющегося и приемником, и передатчиком: он разбивает поступающие от устройства сообщения на пакеты и посылает их по кабелю, и он же принимает адресованные его устройству сообщения, приходящие по кабелю.

Ethernet — сеть широковещательного типа: сообщение от компьютера передается по кабелю в обоих направлениях. Поэтому если два компьютера будут передавать сообщения одновременно, то могут возникнуть конфликты. Каждый интерфейсный блок в сети Ethernet снабжен механизмом обнаружения столкновений, и при конфликте он обрывает передачу и откладывает ее на непродолжительное время; это порождает временные задержки связи. Система работает хорошо, однако с ростом нагрузки она может стать неэффективной, если число столкновений окажется слишком большим. На сегодняшний день

КОММУТАЦИЯ ПАКЕТОВ была изобретена специально для компьютерных сетей. Позиция *a* — компьютер передает сообщение. В первом узле коммутации пакетов (или на интерфейсе между компьютером и узлом) сообщение разбивается на пакеты, каждый со своим адресом (*b*). Пакеты передаются по сети независимо. Каждый узел на трассе пакета выбирает дальнейшее направление его движения, учитывая информацию о потоках, неисправностях и т. п., полученную от соседних узлов. В результате пакеты могут пойти разными путями (*c*) и прибыть в точку назначения в неправильном порядке (*d*). Узел коммутации в точке назначения восстанавливает порядок перед доставкой их принимающему компьютеру (*e*).



скорость передачи данных в сети Ethernet обычно составляет 10 Мбит/с.

Маркерное кольцо — это также широчувствительная сеть. Однако в отличие от Ethernet доступ к ней управляется с помощью маркера (короткой последовательности бит), которая постоянно циркулирует по кольцу. Чтобы начать передачу данных, интерфейсный блок должен дождаться прихода маркера. Получив маркер, этот блок временно удаляет его, впускает в кольцо адресованный кому-то пакет (с заданной максимальной длиной) и за ним снова впускает в кольцо маркер. Пакет будет изъят из кольца получателем прежде, чем маркер обойдет полный круг. Поэтому столкновения произойти не может. Однако в зависимости от интенсивности передач время ожидания маркера может расти, и в сети могут возникать задержки разной длительности.

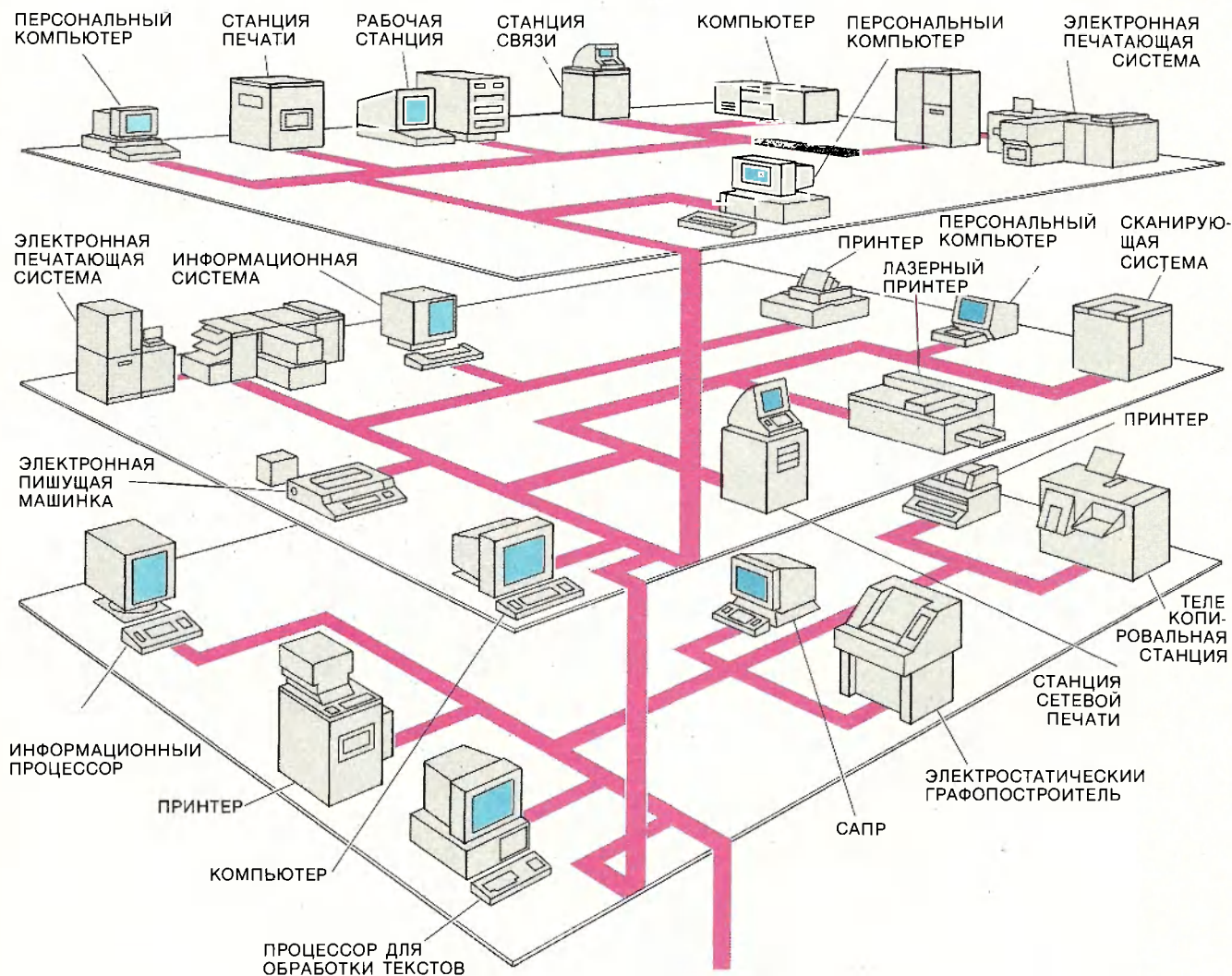
На сегодняшний день маркерные кольца также передают данные со скоростью 10 Мбит/с. В экспериментальных кольцевых сетях на оптическом волокне, в которых данные передаются в виде световых, а не электрических импульсов, достигнуты скорости в 100 и более мегабит в секунду. Оптическая технология еще более расширяет сферу применения локальных сетей.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ идентичных компьютеров имеет определенные преимущества, поскольку программное обеспечение на них также может быть идентичным. Одна из главных задач в организации совместной работы компьютеров разных типов — сделать незаметными аппаратные различия и обеспечить единую программную обстановку на всех компьютерах. В обмене данными между компьютерами уже достигнут

большой прогресс, хотя многие барьеры еще не преодолены. Значительные трудности все еще остаются в обмене программным обеспечением между разнородными системами.

Программы, которыми обмениваются компьютеры одного типа, имеют много больше шансов работать правильно, поскольку рассчитаны на одну и ту же систему команд и одну и ту же операционную систему. Но даже в случае, если программа будет запущена на удаленной стороне без перекомпиляции и каких-либо изменений, все равно ей может, например, не хватить памяти. Условия для компиляции программы на языке высокого уровня могут удовлетворяться на одной машине и не удовлетворяться на другой. Вероятность успешной передачи программы и ее выполнения высока только при идентичной программной среде на машинах.

Наиболее мощные сетевые функ-



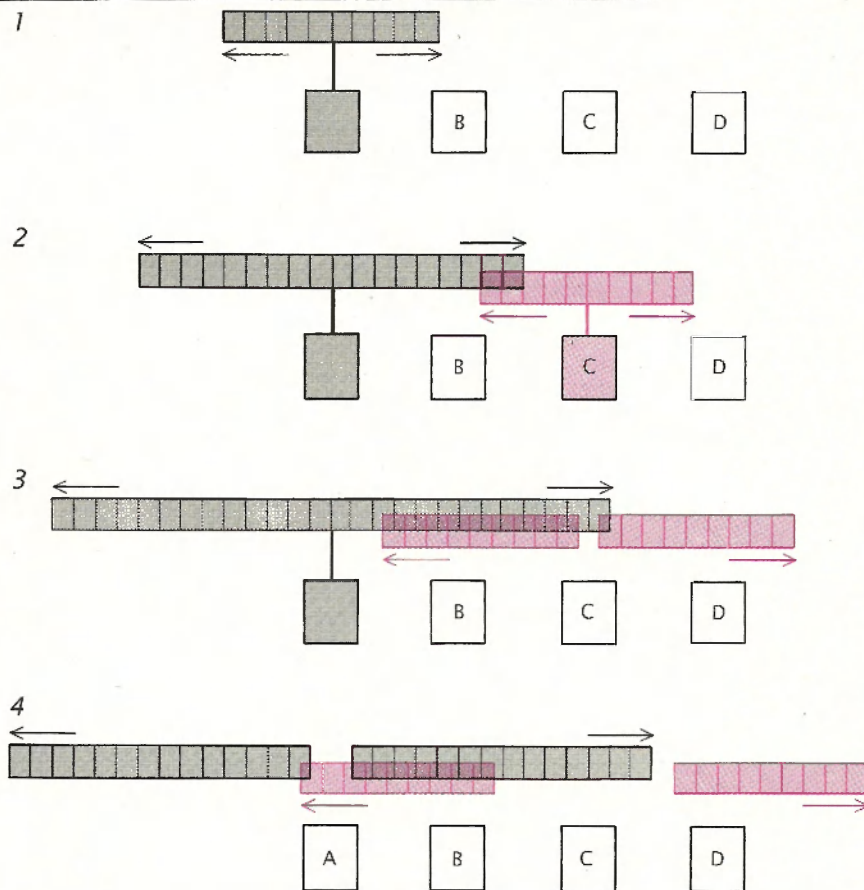
ЛОКАЛЬНАЯ СЕТЬ позволяет рабочим станциям, расположенным в одном здании или на небольшой территории, взаимодействовать и разделять вычислительные ресурсы. Показана сеть Ethernet фирмы Xerox Corporation, в ко-

торой компьютеры и различные устройства подключаются к коаксиальному кабелю или нескольким кабелям, соединенным между собой повторителями.

ции, вообще говоря, были принадлежностью систем однородных компьютеров с общим управлением. Примерами таких функций могут служить распределенные файловые системы (в которых рабочим станциям предоставляется оперативный доступ к файлам независимо от того, в каких точках сети эти файлы расположены) или миграция программ (при которой программы переносятся по сети в точки, где им предстоит выполняться). Взаимодействия между разнородными компьютерами, напротив, остаются довольно простыми — это пересылка сообщений и файлов с машины на машину, запуск программ с удаленного терминала и т. п. Однако разнородность машин в сети является, скорее, правилом, чем исключением; даже в одном учреждении нередко устанавливается оборудование различных фирм-изготовителей. Все это стимулирует усилия по преодолению барьеров, препятствующих взаимодействию разнородных компьютеров.

Приведем простой пример такого барьера. В одном компьютере данные хранятся в виде 32-битовых слов, в другом длина слова составляет 16 бит. При передаче данных принимающий компьютер должен знать, как их располагать в памяти. Поскольку в обоих случаях слово состоит из целого числа 8-битовых символов (байтов), задача решается сравнительно легко. Она становится сложнее, когда 32-битовый компьютер должен взаимодействовать с 36-битовым: здесь либо придется разбивать какие-то байты, либо оставлять пропуски в памяти. Кроме того, просто нельзя передавать «голые» данные без эквивалента «конверта», который как-то описывал бы их или позволял интерпретировать.

Если передаче подлежит программа (в отличие от невыполняемых данных), то необходимость в добавлении информации о контексте, которая дала бы возможность выполнить программу на удаленной стороне, возрастает еще больше. Под «контекстом» может иметься в виду вся программная среда, на которую рассчитана программа, включая и операционную систему. В принципе вместе с программой можно было бы передавать и программную среду, однако на практике это трудно осуществить: многие операционные системы сами рассчитаны на конкретную аппаратуру, и в общем случае их нельзя запустить на компьютере, выпущенном другой фирмой. Такая операционная система, как Unix, написанная на языке высокого уровня, обладает свойством портативности, поскольку соот-



СПОСОБНОСТЬ ОБНАРУЖИВАТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ является важной особенностью сети Ethernet. Поскольку пакеты распространяются по кабелю в обоих направлениях, может случиться, что две станции начнут передачу одновременно. Чтобы избежать приема искаженных пакетов, каждая станция сети Ethernet содержит механизм обнаружения столкновений. В представленной на рисунке последовательности станция A начинает передавать пакет для станции B, когда сеть свободна (1). Однако, прежде чем пакет достигнет станции C, эта станция начинает передачу своего пакета (2). Два пакета сталкиваются, и когда станция C обнаруживает столкновение, она обрывает передачу (3). Вскоре пакет станции C достигает станции A, которая в силу этого также обрывает передачу (4). Обе станции ждут в течение случайно выбираемых коротких интервалов времени, а затем повторяют попытки передачи.

ветствующие компиляторы есть почти на всех машинах. И тем не менее приходится выполнять определенные работы по настройке этой системы на конкретные характеристики компьютера. Одно из возможных решений проблемы — создание «архитектуры виртуальной машины», которая позволила бы замаскировать различия в аппаратном обеспечении разнородных компьютеров. Исследовать различные архитектуры виртуальных машин можно было бы с помощью стандартной микропрограммной архитектуры.

Несколько компьютеров, работающих вместе, образуют распределенную вычислительную систему. Обмен контекстной информацией между компьютерами предполагает наличие серии протоколов, которым входящие в систему компьютеры должны строго следовать, указывая вид контекстной информации и способы ее

интерпретации. Такие протоколы для распределенных систем так же важны, как языки программирования для программного обеспечения. С их помощью описываются общая архитектура и функционирование критических системных элементов.

Было бы желательно, проведя исследования на международном уровне, выработать единый способ взаимодействия в распределенных системах, предоставив поставщикам аппаратуры и программного обеспечения, а также разработчикам сетей возможность следовать стандартным протоколам, принятым в масштабе всей промышленности. Такие протоколы устанавливают некую форму «открытой» архитектуры взаимодействия в сетях.

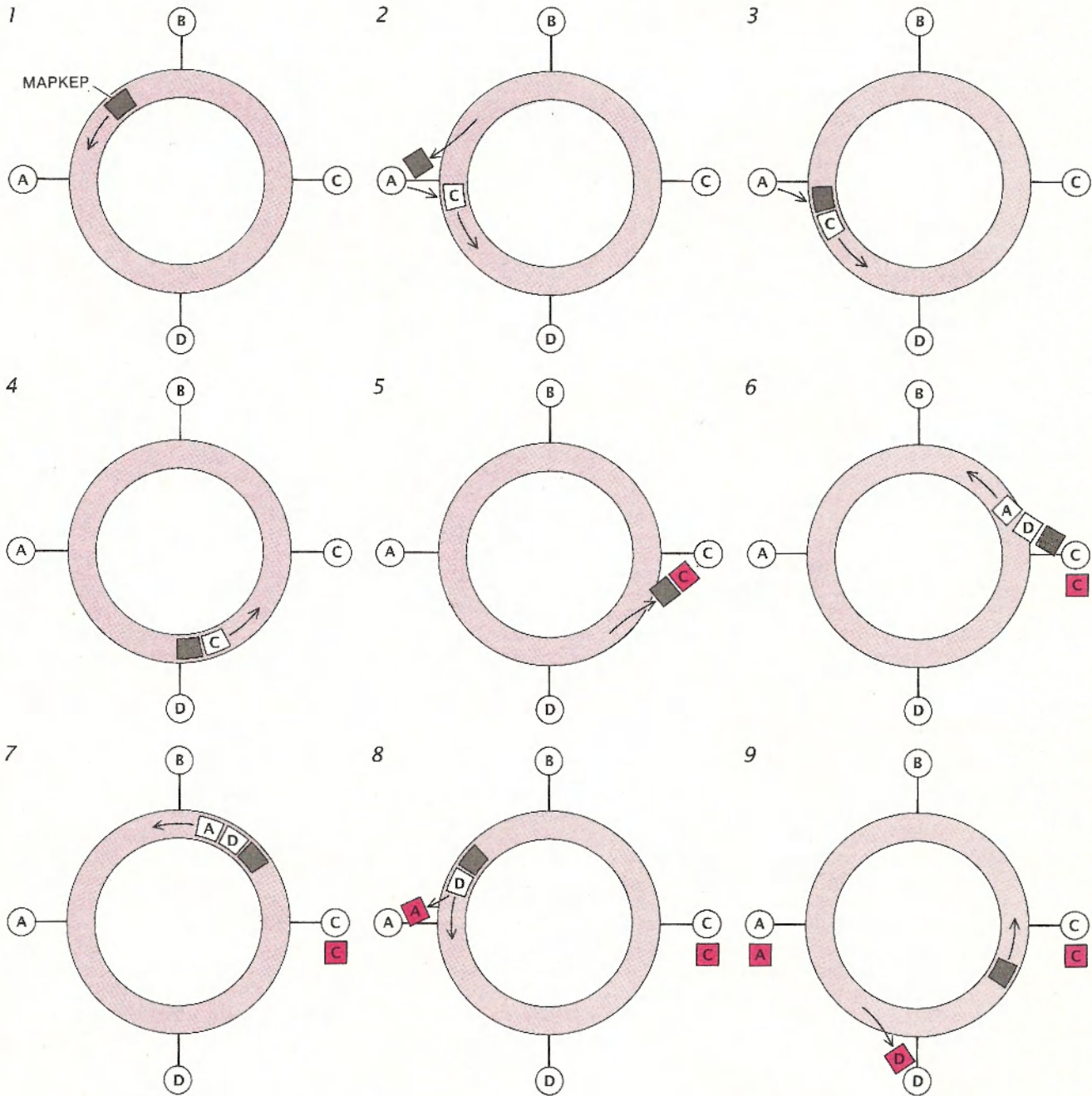
ВТЕЧЕНИЕ нескольких лет в Международной организации по стандартизации (ISO) ведется работа над

проектом сетевых протоколов в соответствии с концепцией, получившей название Соединение открытых систем (Open Systems Interconnection — OSI). В этой работе выдвигается концептуальная модель, в которой все сетевое функционирование разбивается на семь уровней (слоев), каждый из которых характеризуется своим специфическим протоколом или протоколами. Например, на нижнем уров-

не — физическом — специфицируются сигналы, скорости передачи и т. д. На одном из верхних уровней, на уровне «представлений», предписывается, как интерпретировать данные с точки зрения способа их представления; тем самым компьютер, обладающий соответствующим программным обеспечением, преобразующим форматы, получает возможность «беседовать» с компьютером, имею-

щим другой формат данных. Наконец, протоколы самого верхнего слоя специфицируют типы сообщений, которые можно посылать через сеть для решения различных прикладных задач.

Взаимодействия, которые на сегодня допускаются в архитектуре OSI, в основном ограничиваются передачей данных. Она не предписывает какого-либо способа «распределенного» ре-



МАРКЕРНОЕ КОЛЬЦО — другой распространенный вариант локальной сети. Доступом к сети управляет циркулирующая по кольцу последовательность бит, называемая маркером. Чтобы послать сообщение, станция должна сначала дождаться прихода маркера, удалить маркер из кольца, направить в кольцо пакет с адресом (или последователь-

ность пакетов) и в конце снова направить в кольцо маркер. Станции могут удалять адресованные им пакеты, сохраняя в кольце маркер. Показано, как станция А посылает сообщение станции С, которая получает его, а затем посылает сообщения станциям А и D.

шения одной прикладной задачи на нескольких компьютерах сети. И тем не менее при всей грандиозности, хотя и ограниченности целей, стратегия открытой архитектуры оказалась труднореализуемой. Проблема состоит в том, что спецификации протоколов неизбежно двусмысленны, и разные разработчики интерпретируют их по-разному. Единственного различия в интерпретации достаточно для несовместимости выпускаемой продукции.

В 1985 г. группа фирм, выпускающих компьютеры, основала фирму Corporation for Open Systems (COS) для решения проблемы несовместимости между различными реализациями протоколов OSI. Фирма напоминает лабораторию по проверке качества: ее цель проверять различные изделия и сопровождать их сертификатом качества, если они совместимы с другими проверенными изделиями. Такой метод, конечно, не дает полной гарантии. Два изделия, проверенные на контрольных задачах COS, друг с другом могут работать неверно. Поэтому, прежде чем можно будет с достаточной степенью уверенности сказать о сертификации системы, ее надлежит испытать по крайней мере с несколькими другими проверенными системами. С этим контрастируют широкая популярность и отработанность в США транспортного протокола TCP/IP (он предшествовал транспортному протоколу OSI).

Тем временем число сетей растет и какофония усиливается. Проблема совместимости переместилась на другой уровень: не только машины одной сети должны понимать друг друга, но и сами сети должны взаимодействовать между собой. Зачастую организации стремятся связать свою локальную сеть с территориально распределенной сетью или связать вместе несколько локальных сетей. Разные сети, однако, могут иметь разные форматы данных, длины пакетов, скорости передачи (которые в локальных сетях обычно намного выше, чем в территориально распределенных), разные механизмы адресации и т. д.

Первоначальный транспортный протокол главных компьютеров в сети ARPANET был разработан в предположении, что сеть будет функционировать как надежное периферийное устройство. Ясно, что из такого предположения теперь уже исходить нельзя, поскольку появились сети новых типов, например радиосети, которые не всегда могут доставить все пакеты.

ИССЛЕДОВАТЕЛИ в DARPA решили разработать межсетевую архитектуру. Эта архитектура стала

использоваться главным образом для локальных сетей и послужила прототипом для множества других межсетевых архитектур. В протоколе CCITT X.75 определяется другая альтернатива межсетевых взаимодействий — установление виртуальной цепи между сетями. По данному протоколу обычно соединяют сети (виртуальные цепи) с одинаковой скоростью передачи данных, и поэтому не требующие шлюзов.

Межсетевая архитектура включает упомянутый выше транспортный протокол TCP, а также шлюз для соединения сетей. Шлюз — это специальный узел, предназначенный для того, чтобы текст сообщения одной сети привести к форме, принятой в другой сети, и наоборот. В нем используется межсетевой протокол IP (internet protocol) для интерпретации межсетевых адресов, для разбиения при необходимости пакетов на фрагменты и для выполнения других функций, упрощающих транспортировку пакетов между сетями разного типа. Например, если пакет длиной в 500 байт поступает в шлюз для передачи в сеть с максимальной длиной пакета в 250 байт, то шлюз разрезает пакет пополам, снабжает адресами каждую половину и отправляет их (возможно, независимо) по назначению. Шлюзы могут взаимодействовать друг с другом, образуя межсетевую систему, в которой сообщения проходят через много сетей. OSI сейчас также пополняется протоколом IP в качестве механизма межсетевых взаимодействий.

Для объединения сетей не требуется вносить какие-либо изменения в их внутренние механизмы — такова была основная идея при разработке межсетевой архитектуры. Из нее следует, что шлюзы должны обладать следующими ключевыми свойствами: способностью передавать пакеты между сетями с отличающимися внутренними и внешними свойствами (скоростями передачи данных, форматами, синхронизирующими сообщениями, максимальными размерами пакетов и сообщениями об ошибках), а также способностью взаимодействовать с другими шлюзами для решения задачи межсетевой маршрутизации.

Перспективы развития сетей в будущем связаны с мобильными средствами коммуникаций и вычислений. Хотя большинство требований к сетям на сегодня диктуется конторской деятельностью и «домашними» приложениями, распространение сетевых средств на подвижные объекты наверняка приведет к значительным социальным переменам. В принципе уже сейчас есть все необходимое, что-

бы можно было начать вычисления в одном городе, продолжить их, например, в самолете, имея компьютер на коленях, и закончить в другом городе. Портативные средства связи, а именно переносные телефоны, пакетные радиосети, обычная и любительская радиоаппаратура и страничные устройства уже есть в нашем распоряжении. В силу ряда технических ограничений скорость передачи данных для подвижных объектов, по-видимому, не будет превосходить несколько мегабит в секунду. Эта скорость вполне приемлема, поскольку многие важные прикладные задачи требуют среднего объема вычислений и малого объема пересылок данных. С другой стороны, выявляются новые приложения для более быстродействующих средств связи.

Повышение пропускной способности сетей зачастую мотивируется необходимостью обслуживать растущее число пользователей. Хотя запросы одного пользователя могут оставаться на прежнем уровне, их суммарные требования растут. В этом была причина развития аналоговой телефонной связи. Отдельные телефонные каналы объединялись в группы каналов, затем — в супергруппы. Точно так же требования индивидуальных пользователей на передачу цифровой информации могут группироваться на уровне служб связи или на пользовательском уровне. Именно это привело к появлению интегрированных цифровых сетей (ISDN — Integrated Services Digital Network), в которых пользователь сам решает, как должны мультиплексироваться цифровые данные в одной или большем числе цепей. Мультиплексирование, однако, лишь один из вариантов решения проблемы пропускной способности.

В БУДУЩЕМ коренным образом изменятся как виды предлагаемых услуг в пользовании сетями, так и их стоимость. Эти изменения станут возможны отчасти из-за быстрого роста пропускной способности каналов связи. Сегодня тарифы все еще базируются на стоимости одного речевого канала. Если некоторая линия имеет 24 речевых канала иходы компании определяют продажей таких каналов, то вполне естественно, что стоимость пользования этой линией связи должна лежать где-то между стоимостью одного речевого канала и стоимостью 24 речевых каналов. При таком методе установления цен оптические линии связи будут недоступны почти всем пользователям, если существенно не изменить структуру тарифов. Изменение структуры

возможно только при условии, что предприятия связи будут развиваться так, что их доходы станут определяться требованиями более быстрой связи, например видеосвязи. Если связные компании смогут продавать примерно столько же видеоканалов, сколько они продают речевых и примерно по той же цене, они не потеряют в доходах, и тогда появятся благоприятные условия для распространения высокоскоростных каналов. Однако это дело не простое, и рассчитывать на успех можно только в том случае, если в обществе созреет соответствующий социальный заказ.

В своем первоначальном варианте сеть ARPANET, построенная в 1969 г., работала со специальными высокоскоростными (50 кбит/с) выделенными линиями. Национальный научный фонд (NSF) США недавно создал сеть суперкомпьютеров NSFNET, передача данных в которой осуществляется примерно с такой же скоростью. NSF планирует арендовать в ближайшем будущем более быстрые каналы, поскольку фонд стремится удовлетворить нужды научных работников в сетевых услугах на достаточно далекую перспективу. Сегодня доступны линии передачи данных со скоростью 1,5 Мбит/с, и недавно появились первые линии, где скорость составляет 45 Мбит/с. После завершения перехода на волоконнооптические кабели связи эти цифры покажутся скромными. Уже проведены «полевые» испытания каналов, в которых скорость передачи данных превышает 1 Гбит/с, а к концу столетия, возможно, будут достигнуты скорости более 10 Гбит/с. Мультиплексирование сигналов с разной длиной волны, по-видимому, позволит достичь скорости свыше 100 Гбит/с в одном световоде.

Легко представить себе, какие новые возможности открывает такая пропускная способность. Удаленные компьютеры получают быстрый доступ к большим базам данных. Изображения динамических моделей, получивших распространение в научных исследованиях последнего времени, можно будет передавать от суперкомпьютера на рабочие станции. Учреждения, выполняющие совместные работы, смогут одновременно передавать друг другу изображения, речь и данные. Какая при этом потребуется пропускная способность? В терминале с квадратным экраном по 1000 пикселей (элементов изображения) на каждой из сторон один пиксел при черно-белом изображении кодируется одним битом. Передача, скажем, 30 кадров в секунду (чтобы изображение не мерцало) создает поток в

30 Мбит/с. Для кодирования 1 пикселя цветного изображения потребуются 16 бит, и, следовательно, поток в 480 Мбит/с обеспечит быструю передачу изображения с движением в реальном масштабе времени. Когда появятся экраны больших размеров (скажем, 1,2 × 1,8 м), скорость передачи возрастет еще в 10 или даже в 100 раз, если сохранить движение в реальном времени. Методы сжатия информации, несомненно, позволяют несколько снизить требования к пропускной способности. Тем не менее уже ясно, что откроется много новых применений компьютерных сетей при тех скоростях, которые дает связь по волоконнооптическим линиям.

Следует также принять в расчет функции самих компьютеров. Они должны не только выдавать информацию, но и «осмысливать» ее. Что-

бы «осмыслить» картинку, зачастую требуется больше информации, чем содержит сама картинка, и эта контекстная информация должна передаваться вместе с картинкой. То же самое относится и к другой информации, не обязательно представленной в виде картинки, например связанной с обработкой документов или конструированием сверхбольших интегральных схем: чтобы «осмысливать» эту информацию, компьютер должен обладать значительными контекстуальными знаниями. Перспективы оптических средств связи для компьютерных сетей в том, что они делают реальным тот уровень информационных потоков, при котором сети выполняют свое предназначение, а именно позволяют компьютерам быть интеллектуальными партнерами при решении задач, стоящих перед человеком.

Наука и общество

Ищите отраву

НЕХВАТКА продуктов питания на острове Гуам в Тихом океане во время второй мировой войны 45 лет спустя отразилась в нейробиологии: та ситуация помогла установить одну из немногих известных в настоящее время связей между фактором внешней среды и расстройством функционирования мозга. Есть данные, указывающие на то, что редкий токсин, присутствующий в семенах сагового дерева, которые во время войны служили жителям Гуама основным продуктом питания, вызывает неврологическое заболевание, обозначаемое сокращенно ALS-PD. При этом синдроме наблюдаются клинические признаки бокового амиотрофического склероза (ALS — от англ. amyotrophic lateral sclerosis), болезни Паркинсона (P — от parkinsonism) и слабоумия, связанного с болезнью Альцгеймера (D — от dementia). Корреляция между характером питания и ALS-PD наводила на мысль, что перечисленные заболевания тоже могут быть обусловлены факторами окружающей среды.

Медики давно интересовались загадкой болезни, распространенной среди живущей на острове Гуам народности чаморро и известной среди местного населения под названием «райпут» (лень). Синдром ALS-PD у чаморро впервые был отмечен в литературе по неврологии в начале XX в. В конце 1940-х годов смертность от этого заболевания среди чаморро была в 100 раз выше, чем смертность от

бокового амиотрофического склероза в США, причем средний возраст, в котором начиналось заболевание, был на 20 лет меньше. К 1955 г., однако, смертность от ALS-PD на Гуама стала снижаться. Когда такие возможные причины, как генетические нарушения и вирусные инфекции, были исключены, обвинение пало на влияние окружающей среды. Наибольшее подозрение вызывали семена сагового дерева. Мука, получаемая из этих семян, в войну была единственной пищей чаморро; из них делали также припарки для медицинских целей. Известно, что в состав семян сагового дерева входит необычная аминокислота, сокращенно обозначаемая ВМАА, которая сходна с нейротоксином ВОАА, содержащимся в бобовом растении чине посевной. В 60-е годы ВМАА пристально исследовали, но результаты не позволили сделать каких-либо определенных выводов. К середине 70-х годов среди специалистов только один оставался верен гипотезе о пагубном влиянии семян сагового дерева — Х. Керланд из Клиники братьев Мэйо.

В 1980 г. Керланд убедил П. Спенсера из Медицинского колледжа Альберта Эйнштейна возобновить исследование ВМАА. Спенсер разработал методику проверки на приматах связи между ВОАА и латиризмом — отравлением растениями рода *Lathyris* (в частности, чинной посевной), которое вызывает поражение моторных нейронов, проявляющееся в спастическом параличе нижних конечностей и

встречается преимущественно в Индии, Бангладеш и Эфиопии, где поедается большое количество чины посевной.* Он надеется, что таким образом удастся проверить гипотезу об эффекте семян сагового дерева. В 1985 г. Спенсер и его коллеги в сотрудничестве с Фондом медицинских исследований развивающихся стран начали эксперименты по изучению действия ВМАА на макаках. Их результаты, опубликованные в журнале «Science», показывают, что у обезьян, получающих с пищей ВМАА, за несколько недель развивается состояние, подобное синдрому ALS-PD.

Неясно, в чем конкретно заключается действие ВМАА. По-видимому, это вещество косвенно блокирует рецепторы глутамата, участвующие в регуляции деятельности нервных клеток. Известно, что ВМАА принадлежит к числу «медленных» ядов: может пройти 30 и более лет, прежде чем нарушения, вызванные им, проявят себя. Для тех чаморро, которые уезжают с родного острова в юном возрасте, все равно высок риск развития ALS-PD в зрелые годы. К счастью, и ВМАА и ВОАА встречаются редко, так что человек, никогда не употребляющий в пищу семена сагового дерева или чину посевную, вряд ли столкнется с этими веществами.

Собственно говоря, вещества, роль которых в возникновении заболеваний мозга четко установлена, совсем немного. Кроме ВМАА и ВОАА известно еще смертоносное соединение, обозначаемое МРТР, которое присутствует в виде примеси в искусственно синтезируемых некоммерческих лекарственных и наркотических препаратах. Но этот «черный список», наверное, скоро увеличится. По мнению Спенсера, его работы побудят к широкому поискам нейротоксических агентов. «Теперь есть основания искать в окружающей среде факторы, вызывающие боковой амиотрофический склероз, болезни Паркинсона и Альцгеймера, — сказал он, — и исследования в этом направлении следует вести широким фронтом». Спенсер надеется, что такие исследования принесут пользу, конечно, не только в США. Но на острове Гуам семена сагового дерева все еще входят в обычный рацион местных жителей.

* Биохимический эффект семян растений рода *Lathyrus* обусловлен наличием в них β-цианаланина и продукта его декарбокислирования β-аминопропионитрила, который, по-видимому, является ингибитором лизилоксидазы — фермента, необходимого для образования поперечных связей в коллагене и эластине. — Прим. ред.

Пятнистая сова под угрозой

ЗАГОТОВКА древесины — важный источник дохода в северной части Тихоокеанского побережья; в этом районе годовой объем сбыта лесоматериалов составляет несколько миллионов долларов и 3—6% рабочих мест в обрабатывающей промышленности связано с лесоводством. Размеры лесозаготовок в точности не определены, но известно, что за последние 25 лет вырублено 360 тыс. га леса.

Значительная часть заготовок древесины ведется в древних хвойных лесах, являющихся государственной собственностью. Независимые заготовители сталкиваются там с «проблемой пятнистой совы». Пятнистой сове *Strix occidentalis caurina* — крупной (40—50 см в длину) хищной птице — для нормального существования необходима обширная территория; чтобы охотиться, гнездиться и успешно выращивать потомство каждой «супружеской» паре, которых насчитывается около 2000, нужно 400—1600 га ненарушенного старого леса, что означает сотни тысяч гектаров потенциальной территории лесозаготовок.

Для сохранения вида и его местобитания в конце июля 1987 г. Фонд законодательных мер защиты природы Сьерра-Клаб от имени нескольких ведущих групп по охране окружающей среды подал правительству США петицию, призывающую внести пятнистую сову в официальный список видов, находящихся под угрозой. Эта петиция — контрмера составленному Службой лесов США заключению о воздействии на окружающую среду, которое должно быть опубликовано в 1988 г. В нем определяются охранные меры по отношению к пятнистой сове: резервировать 550 подходящих для ее обитания участков площадью 400—800 га (по одному на пару птиц). Но 75% этих участков находится вне основных районов лесоразработок, и весь план охватывает лишь 25% особей, так что, по мнению многих биологов, заключение Службы лесов отвечает интересам промышленности, а не природы.

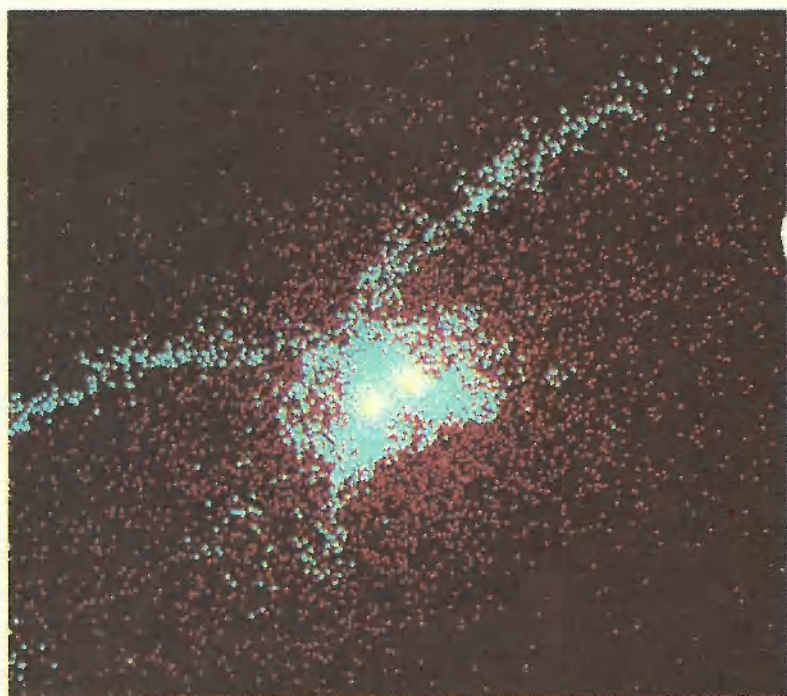
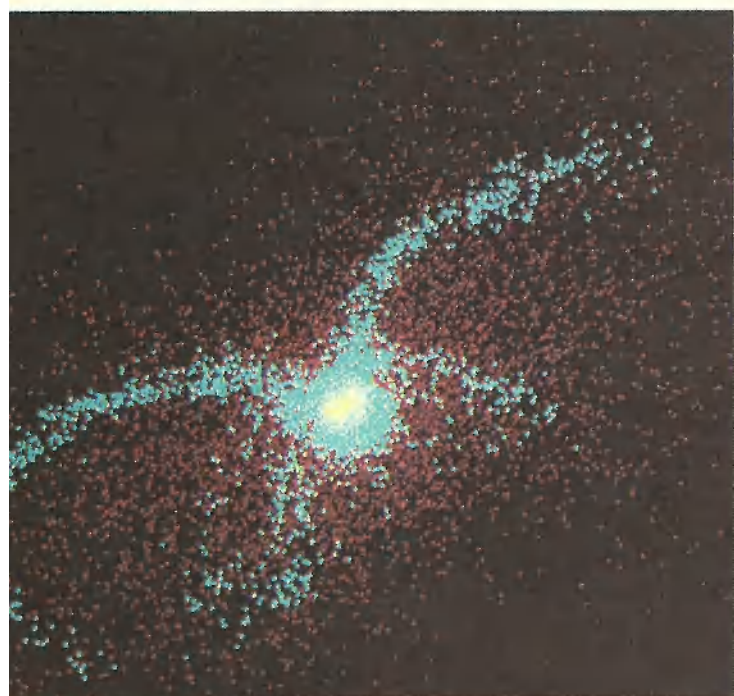
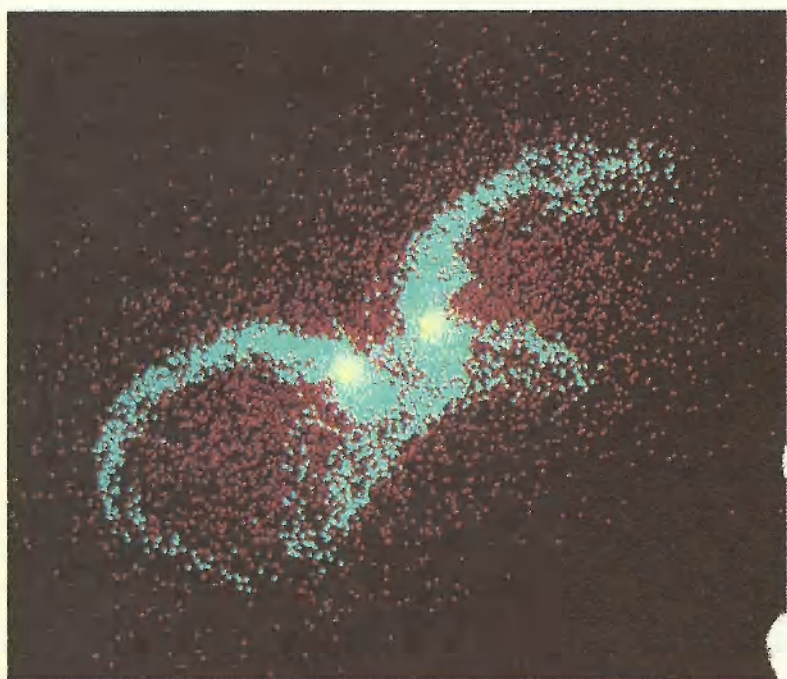
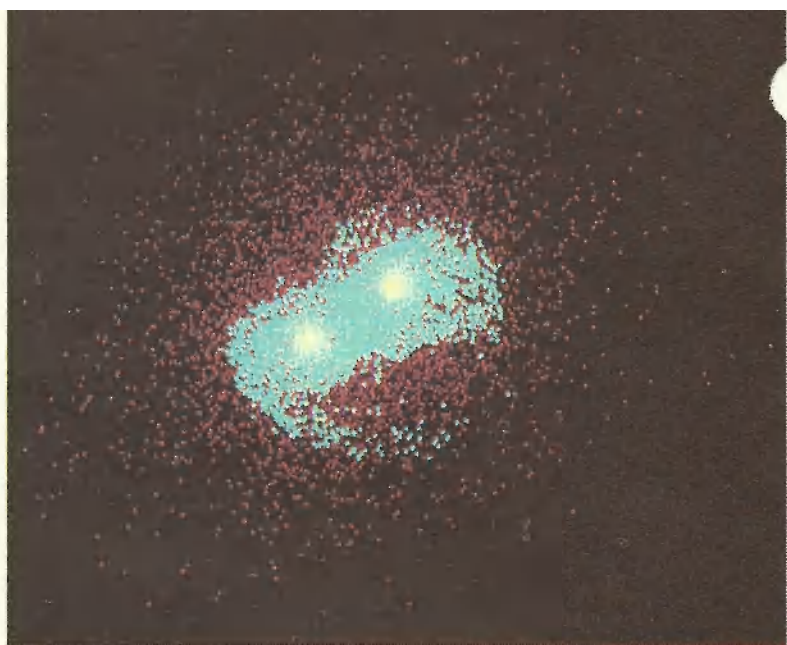
Некоторые государственные лица считают, что такая позиция в вопросе о соотношении экономики и экологии правильная. Согласно департаменту лесного хозяйства шт. Орегон, «если слишком большую площадь старых лесов оставить в неприкосновенности ради сов, это нанесет необратимый ущерб экономике штата в целом». Экономист шт. Орегон Э. Хагус заявила, что ограничения лесозаготовок



ПЯТНИСТАЯ СОВА может жить только в старых лесах северной части тихоокеанского побережья Америки, площадь которых сокращается из-за лесозаготовок.

приведут к тому, что штат потеряет 1740—4200 рабочих мест и увеличится нужда в социальных услугах, работах по улучшению быта, благотворительности и т. п.

Нанесение ущерба невозобновляемым природным ресурсам по экономическим соображениям многими, особенно биологами, осуждается. Р. Гутьеррес из Государственного университета Гумбольдта выразил это отношение так: «США — одна из немногих стран, признающих за животными неотъемлемое право на существование. Игнорировать это обязательство ради того, чтобы лесная промышленность делала деньги, — неудачная, мягко говоря, позиция». Он считает, что правительству следует обратить внимание на негативное воздействие, оказанное лесозаготовками на невозобновляемые природные ресурсы — например, лосося, — которые потенциально более выгодны и требуют меньше затрат на освоение, чем товарный лес. «Что нам действительно нужно, — сказал директор программы по сохранению исчезающих видов млекопитающих и птиц в Национальном одюбоновском обществе У. Тилт, — это равновесие между экономическими интересами и заботой об окружающей среде. Если мы сведем проблему к противопоставлению численности сов и занятости населения, то потеряем все».



Вычислительные системы для научных исследований

Вычислительные эксперименты на компьютерах обогащают методику научных исследований. В этой области они начинают играть столь же важную роль, как теория, наблюдения и лабораторные эксперименты

ПИТ ХАТ, ДЖЕРАЛЬД ДЖЕЙ САССМЕН

ПРИМЕНЕНИЕ компьютеров с повышенным быстродействием существенно изменяет методику научных исследований. По сложившейся традиции ученые разрабатывают идеализированные упрощенные модели; получаемые с их помощью предсказания проверяются в ходе наблюдений или экспериментов. Однако сложные системы трудно упростить так, чтобы, образно говоря, «вместе с водой не выплеснуть и ребенка». Некоторые очень важные явления могут обнаруживаться в результате непредвиденных комбинаций или усиления действия малых эффектов.

Компьютеры позволяют успешно анализировать различные по своей природе явления — от диффузии носителей заряда в полупроводнике до столкновений галактик, содержащих миллионы звезд. Используя модели таких систем, можно в сложных ситуациях обходиться простыми теоретическими предположениями. Кроме того, при наличии достаточных вычислительных ресурсов появляется возможность исследовать теоретические модели без введения сомнительных приближений или упрощений. Точная вычислительная модель приближается по методике измерений к обычному лабораторному эксперименту. Преимущество вычислительного эксперимента заключается в том, что объектами исследования могут быть параметры, не доступные для прямых измерений. Например, поскольку ньютоновский закон тяготения хорошо изучен и существуют

точные численные модели Солнечной системы, можно поставить такой «гипотетический эксперимент»: как изменилась бы орбита Земли, если бы не существовал Марс?

Часто теоретики вынуждены идти на упрощения, чтобы можно было получить исходные данные для сравнения с реальными явлениями. Одним из важных последствий роста вычислительных ресурсов, доступных исследователям, стала их переориентация с методов анализа упрощенных моделей на метод, получивший название «анализ путем синтеза». Синтетический подход применяют в тех случаях, когда законы взаимодействия между компонентами известны, но остается неизвестной действительная конфигурация системы. Цель синтеза — восстановление истинной конфигурации путем моделирования последствий развития нескольких возможных конфигураций. Сравнивая результаты прямых измерений с результатами моделирования, можно установить, какая конфигурация лучше всего согласуется с данными наблюдений.

Именно таким путем в XIX в. удалось понять причины возмущений, обнаруженных в орбитальном движении планет Уран. Ученые ввели в модель Солнечной системы гипотетическую планету и варьировали параметры ее орбиты, пока не добились эффектов, сходных с данными наблюдений. Результатом стало обнаружение планеты Нептун. В прошлом синтетический подход находил применение лишь в сравнительно простых си-

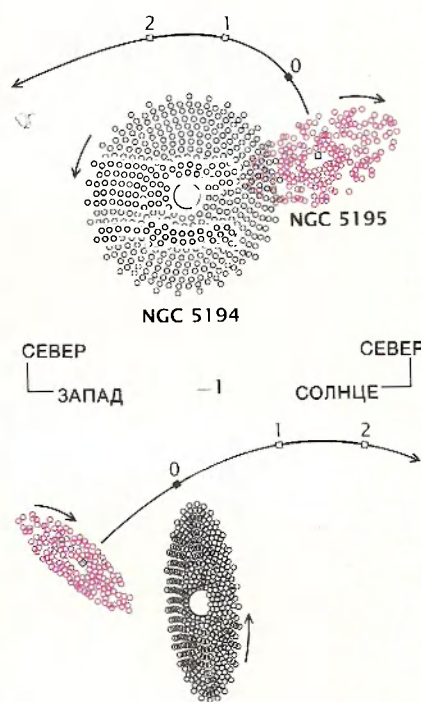
туациях. Использование высокопроизводительных компьютеров ставит синтетические методы в один ряд с традиционными методами, основанными на исследовании упрощенных моделей.

ПРИ РАССМОТРЕНИИ классических задач астрофизики и гравитационной динамики применение вычислительных машин с повышенным быстродействием в рамках концепции «анализ путем синтеза» позволило исследовать те задачи, которые ранее не поддавались решению другими методами.

Вселенная в больших масштабах весьма неравномерно населена галактиками — некоторые из них находятся в относительной изоляции, другие образуют скопления и группы скоплений. В состав галактики входят множество звезд, пыль и газ. Расстояния между звездами велики по сравнению с их собственными размерами, поэтому столкновения звезд крайне редки, хотя их относительные скорости составляют десятки или сотни километров в секунду. На следующем структурном уровне речь идет о столкновении галактик; такие события происходят гораздо чаще, поскольку расстояния между галактиками всего в 10—100 раз превышают их характерные размеры. Еще более массивные объекты — скопления галактик — разделены расстояниями, сравнимыми с размерами самих скоплений; их столкновения происходят за характерное время, сравнимое с возрастом Вселенной, поэтому эти события нельзя рассматривать изолированно от эволюции Вселенной в целом.

Столкновения галактик — наиболее примечательные «дорожные происшествия» во Вселенной. Наблюдения с помощью телескопов помогли обнаружить многие события такого типа. Известны парные галактики, находящиеся близко друг к другу на небе; создается впечатление, что такие галак-

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КАДРОВ «компьютерного фильма» моделирует столкновение двух спиральных галактик. Изображение справа внизу напоминает пару галактик, известных как «галактики с антеннами» (галактики NGC 4038 и NGC 4039) в созвездии Ворон. Желтые точки соответствуют концентрациям звезд в центре (балджу); синие точки — периферийным звездам дисков. Красные точки изображают гало невидимого (темного) вещества, для которого характерны гравитационные эффекты. Расчет, охватывающий период примерно в 0,5 млрд. лет, проведен Дж. Барнсом из Института высших исследований.



КЛАССИЧЕСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ эксперимент по столкновению галактик, выполненный в начале 70-х годов Аланом Тоомре из Массачусетского технологического института и Юри Тоомре (который работал в то время в Нью-Йоркском университете). Модель описывает «встречу» ту-

манности Водоворот (галактика NGC 5194, или M51) с галактикой NGC 5195 (слева). Братья Тоомре выбрали серию начальных условий после тщательного изучения данных наблюдений. Для каждого набора начальных условий они получили серию «снимков». В одном из случаев изображе-

тики соединены «мостами» — выбросами вещества. В то время как большинству галактик свойственны регулярные очертания (симметричные спиральные, сферические или эллиптические), взаимодействующим галактикам присущи обычно некоторые деформации. В 50-х годах было высказано предположение о том, что эти деформации обусловлены гравитационным взаимодействием вещества галактик. С 60-х годов распространились более экзотические теории с учетом магнитодинамических и взрывных эффектов. Причиной отказа от простых гравитационных моделей явились сложности в объяснении тонкой структуры «хвостов» и «мостов», возникающих при взаимодействии галактик, только на основе гравитационных эффектов. В начале 70-х годов Алар Тоомре из Массачусетского технологического института и Юри Тоомре (в то время сотрудник Нью-Йоркского университета) провели первый вычислительный эксперимент по моделированию столкновения галактик. Результаты оказались неожиданными: заложив в модель действие только сил тяготения, им удалось воспроизвести конфигурации, наблюдаемые в некоторых системах взаи-

модействующих галактик. Братья Тоомре использовали приближение гравитационного поля галактики полем точечной массы, расположенной в ее центре. Моделью галактического диска, насчитывающего десятки миллиардов звезд, послужила система из нескольких сотен частиц, движущихся в поле галактики и не вносящих собственный вклад в это поле. Даже при таком грубом приближении они обнаружили, что столкновения двух модельных галактик сопровождаются значительным выбросом звезд различного вида, в том числе в форме «листов» и «лент». Наблюдением их с «ребра» можно объяснить присутствие в картинах взаимодействия тонких и четких деталей, которые привели других исследователей к предположению о сложных магнитогидродинамических эффектах.

Работа братьев Тоомре является отличным примером извлечения новой информации из данных синтетического эксперимента. Последовательность «моментальных снимков», полученных с помощью компьютера (см. рисунки на с. 78 и 79), показывает, что выброс, как будто соединяющий туманность Водоворот (галактика NGC 5194, или M51) с галактикой

NGC 5195, на самом деле выбросом не является. «Перемычка» между галактиками представляет собой оптическую иллюзию, вызванную особенно-стями расположения галактик вдоль луча зрения.

Многие физические проблемы остаются неразрешимыми на пути попыток «лобового» синтеза всеобъемлющих моделей. Возможен, однако, обходный маневр, при котором моделируется поведение микроскопических фрагментов большой системы. Синтетические методы часто позволяют получить количественные оценки статистики поведения малых фрагментов макроскопической системы. Модель более высокого уровня, в которой статистические закономерности становятся строительными блоками, позволяет прогнозировать поведение системы в целом.

ПРИМЕРом задачи, для которой сегодня не может быть получено удовлетворительное решение, является детальное моделирование эволюции звездных скоплений, насчитывающих, например, в нашей Галактике до миллиона звезд. Однако оказалось возможным разобраться в структуре таких скоплений с привлечением мик-



ние (справа) напоминает наблюдаемую конфигурацию этих галактик. В двух рядах представлены различные картины одного и того же события, которые разделены интервалами по 100 млн. лет. Эксперимент показывает, что «перемычка», как будто соединяющая галактики M51 и NGC

5195, представляет собой оптическую иллюзию. В этот момент NGC 5195 находилась далеко за M51, а их столкновение произошло в прошлом.

роскопических моделей; в них изучается взаимодействие между одиночной и двойными звездами (две звезды, объединенные силами тяготения и обращающиеся вокруг общего центра).

Гравитационное взаимодействие между двумя звездами или планетами — это задача, которая легко решается с помощью карандаша и бумаги. Однако при описании взаимодействия трех тел уравнения движения становятся крайне сложными. Что происходит, например, при столкновении одиночной и двойных звезд? Если их разделяет большое расстояние, то две звезды, составляющие пару, вращаются, описывая относительно друг друга невозмущенные эллиптические орбиты. Если одиночная звезда проходит на незначительном расстоянии от двойных, то собственные орбиты звезд в двойной системе окажутся под воздействием возмущения. Если же одиночная звезда проникает в двойную систему, то результат такого проникновения оказывается гораздо более сложным.

Возможны три качественно различных результата такого проникновения. В одном из них двойная система распадается, и движение всех трех звезд перестает быть связанным. В

этом случае по аналогии с атомной теорией можно говорить об «ионизации» двойной системы. В остальных двух вариантах сохраняется схема «двойная система — одиночная звезда». Если место одной из звезд в двойной системе занимает звезда-пришелец, то можно говорить о «реакции обмена». Если же состав двойной системы остается неизменным, то такой вариант следует назвать «пролетным». Наконец, при почти лобовом сближении двойная система может временно захватить одиночную звезду. Такая тройная система может оставаться в связанном состоянии долгое время — иногда нестабильные связи сохраняются на протяжении сотен и даже тысяч орбитальных периодов, но в итоге она вновь распадается, образуя двойную систему и одиночную звезду.

Конечный результат такого события в большой степени зависит от начальных условий. Незначительные вариации скоростей или углов сближения могут радикально изменить характер взаимного движения трех тел. Аналитическое описание их поведения явно невозможно.

Число параметров, задающих начальные условия в подобной задаче о

расстоянии, — девять, что не позволяет провести систематический перебор всех возможных комбинаций. Характер зависимости динамики такой системы от точных значений параметров крайне сложен. Даже если зафиксировать 7 из 9 параметров, картина взаимодействия впечатляет сложностью (см. рисунок внизу на с. 80).

Количественные оценки процессов рассеяния в задаче трех тел могут быть получены путем проведения большого числа вычислительных экспериментов с последующим статистическим анализом полученных результатов. Значения большинства параметров задаются при этом случайным образом, разумеется, в интересующих исследователя областях изменения. Если число экспериментов достаточно велико, то неопределенности, вносимые при таком статистическом подходе (он носит название метода Монте-Карло), становятся пренебрежимо малыми и данные, описывающие наиболее вероятный результат рассеяния, приобретают статистическую значимость.

ПОЧЕМУ астрономы заинтересованы в решении задач такого типа? Дело в том, что двойные системы

играют важную роль в процессе «разогрева» звездных скоплений. В столкновениях рассматриваемого типа двойные системы могут сжиматься, передавая энергию одиночным звездам и увеличивая таким образом энергию звезд своего ближайшего окружения. Можно провести аналогию между этим явлением и процессом термоядерного синтеза, когда столкновение атомных ядер приводит к образованию более тяжелых ядер и высвобождению энергии. Именно термоядерный синтез — источник энергии звезд и Солнца.

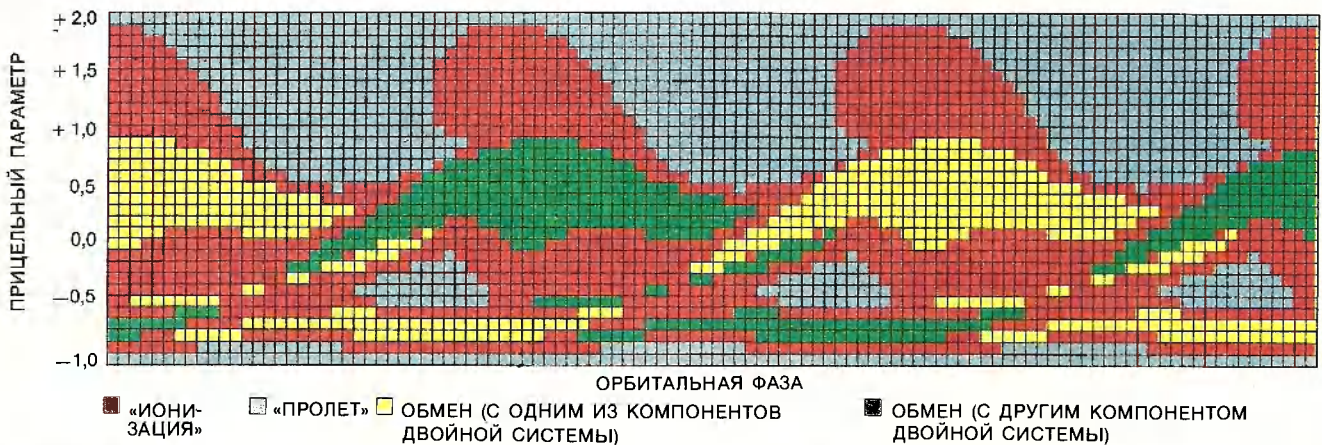
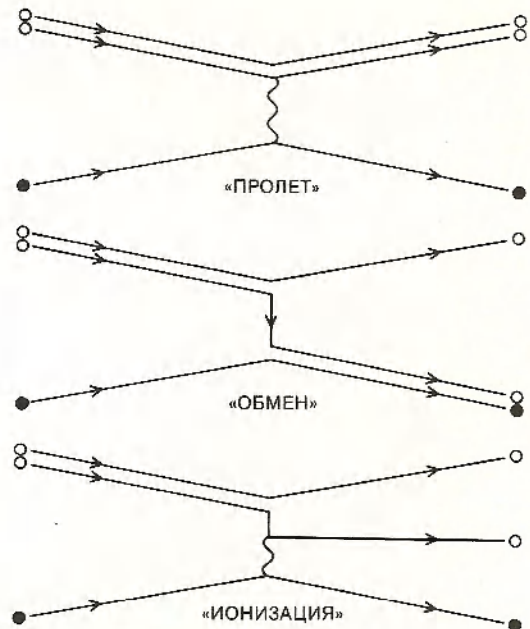
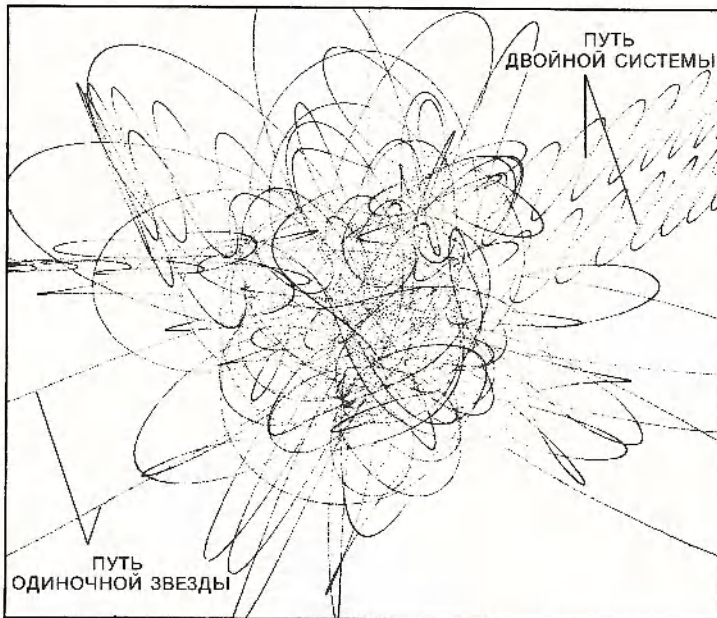
Аналогично сжатие орбит звезд в двойных системах, вызываемое их сближением, может быть источни-

ком разогрева ядер плотных звездных скоплений. Эта энергия может компенсировать радиационные потери энергии с периферии звездных скоплений. Построение моделей шаровых скоплений невозможно без учета энергетического механизма взаимодействий типа описанных выше. Подобно тому как при расчете структуры и эволюции отдельных звезд необходимо знать скорость происходящих в них термоядерных реакций, расчет структуры и эволюции звездных скоплений невозможен без учета скорости гравитационных взаимодействий между звездами в этих скоплениях.

Метод расчета скорости таких «гравитационных реакций» можно

позаимствовать из атомной физики. Здесь экспериментаторы направляют пучок ядер определенного типа, разогнанных до высоких скоростей, на мишень из материала, содержащего ядра другого типа. Путем подсчета числа взаимодействий, измерения свойств этих взаимодействий и статистического анализа результатов можно построить усредненное описание поведения ядер при столкновениях.

Скорость гравитационных реакций может быть рассчитана с помощью вычислительного эксперимента. Один из авторов данной статьи (Хат) участвовал в исследованиях динамики звездных скоплений методом статистического описания процессов рассе-



СТОЛКНОВЕНИЕ одиночной звезды с двойной системой — сложный процесс, как можно видеть по изображению, полученному с помощью вычислительного эксперимента (слева вверху). Попытки решить такую задачу вручную не привели к успеху. Однако можно пренебречь деталями и выделить суть процесса, классифицируя лишь его конечный результат, как это делают в физике элементарных частиц. В этом случае возможны три варианта (справа вверху). При «пролете» двойная система сохраняется, даже если изменяются ее орбитальные параметры. При «обмене»

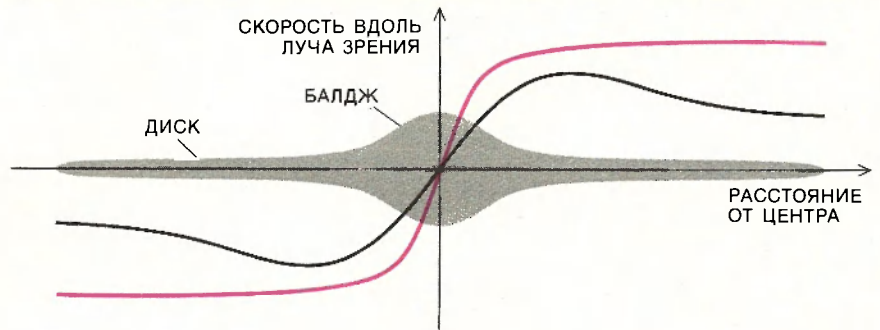
одиночная звезда замещает одну из звезд двойной системы. При «ионизации» все звезды оказываются несвязанными. Число параметров, необходимых для описания начальных условий в таких экспериментах, равно девяти — простой перебор комбинаций невозможен. Диаграмма внизу обобщает результаты более 1000 экспериментов; в данном случае фиксируется семь параметров и изменяются два — прицельный параметр (точка ближайшего подхода одиночной звезды к двойной системе) и орбитальная фаза (относительное положение звезд в двойной системе).

яния в задаче трех тел. В ходе исследований были проведены миллионы экспериментов методом Монте-Карло; при двух фиксированных параметрах изменялись семь свободных параметров статистического эксперимента.

ОСУЩЕСТВИМОСТЬ этого эксперимента не составила затруднений; потребовалось менее одного года машинного времени на компьютере VAX 11/780 фирмы Digital Equipment Corporation. Проведение аналогичного эксперимента для описания взаимодействия галактик вызывает существенные трудности. Подобно тому как физики изучают структуру атомов и элементарных частиц, анализируя продукты их столкновений, изучение «дорожных происшествий» при взаимодействии галактик позволяет сделать выводы о природе и распределении вещества во Вселенной. Хотя за последние десятилетия удалось узнать многое о структуре Вселенной, все еще неизвестно, где заключена основная масса Вселенной. Звезды, газ и пыль, наблюдаемые с помощью радио-, инфракрасных, рентгеновских и гамма-телескопов, составляют только малую долю общей массы Вселенной. Физическая природа невидимого вещества (скрытой массы) остается одной из центральных нерешенных задач в астрофизике.

Изучение динамики многих галактик свидетельствует о содержании в них большого количества невидимого вещества. В типичной спиральной галактике, имеющей форму диска, звезды вращаются вокруг общего центра масс. В соответствии с законом тяготения, орбитальная скорость звезды должна быстро убывать с ростом радиуса орбиты в предположении, что видимое вещество составляет всю массу галактики. На самом деле орбитальная скорость звезд не убывает с ростом радиуса орбиты; более того, на значительных радиальных расстояниях она сохраняется примерно постоянной. Постоянство орбитальной скорости означает, что большая часть массы галактики остается невидимой и что эта скрытая масса распределена в большом объеме вокруг видимой части галактики.

Столкновения галактик дают возможность изучить распределение скрытой массы. Картина столкновения позволяет судить о гравитационном поле скрытой массы. Фактически мы судим о распределении невидимого вещества по косвенным эффектам — распределению звезд в занимаемом галактикой объеме. Интерпретация этих распределений может быть эффективно проведена в крупномас-

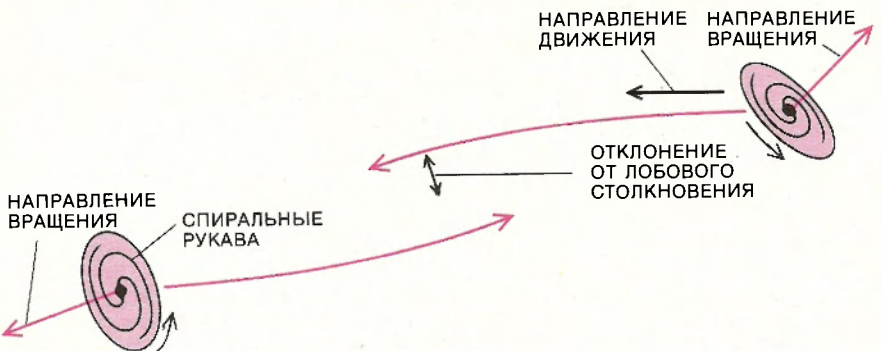


СУЩЕСТВОВАНИЕ ТЕМНОГО (невидимого) вещества во Вселенной следует из соображений динамики. В типичной спиральной галактике, такой, как «Сомbrero» (M104), звезды сильно концентрируются в ее центре (*вверху*). Эту концентрацию массы астрономы называют «балдж»; далее расположены диск (*внизу*) и невидимое гало. В соответствии с ньютоновским законом тяготения если между звездой в диске и балджем нет невидимого вещества, то орбитальная скорость вращения звезды должна быстро убывать по мере роста ее расстояния от балджа (*черная кривая внизу*). На самом деле точные наблюдения показывают, что орбитальная скорость не убывает; на больших расстояниях она остается постоянной (*цветная кривая*). Постоянство скорости означает, что видимые объекты окружены большим количеством невидимого вещества.

штабных вычислительных экспериментах. Только с их помощью можно оценить как количество вещества в галактике, так и его пространственное распределение. При наличии достаточных вычислительных ресурсов и программных средств можно провести моделирование многих явлений интересующего нас типа, меняя параметры сближения и распределение масс. Затем останется отобрать среди полученных картин тонкой структу-

ры галактик те, которые наилучшим образом согласуются с данными наблюдений. В результате, если модели обладают достаточной чувствительностью к изменениям параметров, можно с уверенностью судить о количестве вещества и его пространственном распределении в галактике.

В типичной галактике обычно около 100 млрд. звезд, связанных гравитационными взаимодействиями. Решение задачи о таком гигантском ко-



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕВИДИМОГО ВЕЩЕСТВА в галактиках может быть рассчитано с помощью вычислительных экспериментов, моделирующих их столкновения. Особенности распределения звезд позволяют выявить гравитационное поле невидимого вещества.

личестве взаимодействия находится за пределами возможностей любого вычислительного устройства, которое можно сегодня себе представить. Однако поведение такой системы можно приближенно описать с помощью системы, в которой ансамбли по миллиону «частиц» каждый представлены поведением одной модельной частицы.

Каким же оказывается минимальное число частиц в эксперименте, моделирующем сближение двух спиральных галактик? Нужно, очевидно, чтобы модель обладала достаточной точностью для детального количественного сравнения с эффектами, наблюдаемыми в действительности.

В реальной галактике звезды сильно концентрируются в центре; эта концентрация звезд, которую астрономы называют «балдж», может быть несколько сплюснутой в результате вращения; далее расположен диск, образованный периферийными звездами и газом, движущимися в основном по круговым орбитам; и затем — более протяженное, имеющее примерно сферическую форму гало темного (невидимого) вещества, о присутствии которого можно судить по косвенным данным. Эти компоненты находятся в устойчивом, ста-

ционарном равновесии, определяемом их гравитационным взаимодействием. Поскольку в спиральных галактиках диаметр диска почти в 100 раз превышает его толщину, диск в модели должен быть представлен скоплением нескольких сотен тысяч частиц. Модель с меньшим числом частиц не позволяет учесть конечную толщину диска. В сближающихся галактиках число частиц во всех компонентах должно быть примерно одинаковым, поэтому реальная модель столкновения галактик должна включать немногим менее миллиона частиц.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ уравнений движения для системы, содержащей от полумиллиона до миллиона взаимодействующих частиц, требует применения наиболее совершенных численных методов и самых высокопроизводительных компьютеров. Для проведения вычислительного эксперимента должны быть заданы не только огромное число параметров, характеризующих возможные начальные условия, но и распределения всех компонентов, дающие в совокупности модельные галактики. Выбору подлежат также все начальные параметры сближения.

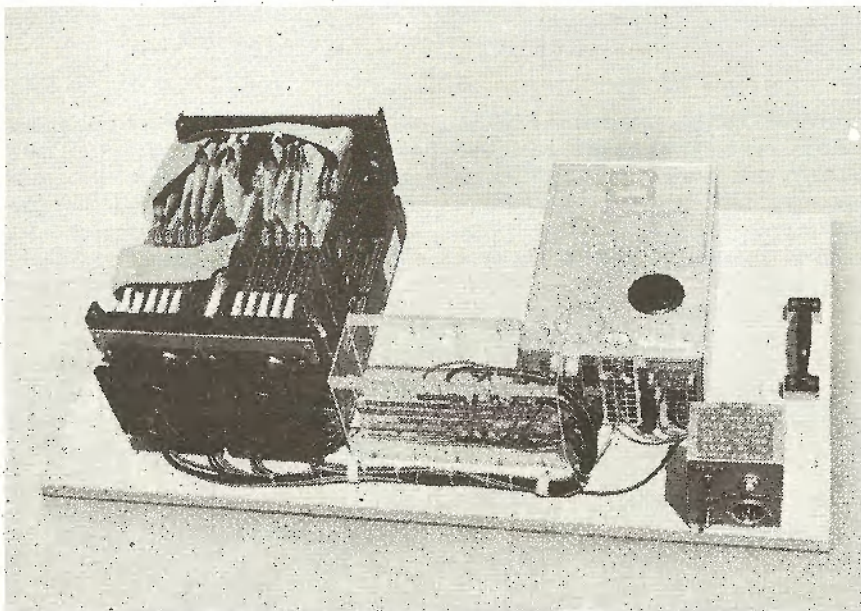
Наиболее сложная задача в таком вычислительном эксперименте — анализ результатов. Частично его необходимо проводить уже в ходе моделирования, чтобы определить возможность завершения данного расчета. Нетривиальным оказывается и выбор начальных условий для каждого из последующих вариантов расчета. Наконец, анализ должен выявить качественную структуру и набор параметров модели, характеризующие результаты расчетов многих вариантов (данные по ансамблю).

Как определяются условия завершения эксперимента, описывающего столкновение галактик? Представим себе «фильм», в котором показан процесс столкновения. Галактики сближаются, затем сталкиваются, что сопровождается большим выбросом звезд, а потом либо сливаются в единую галактику, которая вскоре приходит в состояние равновесия, либо разлетаются, причем каждая в результате столкновения оказывается несколько поврежденной. Через некоторое время можно определить, какой из этих вариантов имеет место. В этот момент можно приступить к исследованию количественных и качественных следствий эксперимента.

Определение условий завершения и классификации конечного результата эксперимента — это задачи, требующие применения методов распознавания образов. Решение их автоматическими методами — дело трудное, но возможное. Исходная система состоит из двух туманностей, каждая из которых обладает компактным плотным ядром. По мере развития процесса сближения ядра либо расходятся по несвязанным орбитам, либо сливаются. При слиянии прежде, чем ядра объединятся в единую (связанную) систему, они могут несколько раз пролететь друг около друга, двигаясь по вытянутым орбитам. В ходе этого процесса одни частицы окажутся свободными, а другие образуют связанные или несвязанные переходные структуры: оболочки, перемишки и хвосты.

Задача распознавания должна быть решена в качественном виде. Нужно выделить центральное ядро, движущееся по гладкой траектории. Решение такой задачи для последовательности «кадров» модели не требует больших вычислительных ресурсов. Отслеживание траекторий ядер позволяет классифицировать конечный результат эксперимента.

В настоящее время нами подготовлен долгосрочный эксперимент по моделированию столкновения галактик. Получение результатов с учетом требуемого объема вычислений зай-



«ДИДЖИТАЛ ОРФЕРИ» — специализированный компьютер для моделирования планетарных орбит с высокой скоростью и точностью. Устройство имеет объем ~ 0,03 м³ и «рассеивает» мощность 150-ваттной электролампы. Для своего класса задач компьютер обеспечивает выполнение примерно 10 млн. арифметических операций с плавающей точкой в секунду, что в 60 раз быстрее, чем у компьютера VAX 11/780. Параллельная архитектура специализированного компьютера, хорошо согласующаяся с задачами орбитальной механики, обеспечивает достижение столь высокого быстродействия. Компьютер применяется для расчета орбит пяти внешних планет Солнечной системы за предыдущие 100 млн. лет и последующие 100 млн. лет. Этот период в 40 раз превышает использовавшиеся ранее интервалы для интегрирования движения планет.

мет несколько лет. Проведению эксперимента может способствовать применение параллельных вычислительных систем (см. статью Джеффри Фокса, Пола Мессины «Архитектура компьютеров» на с. 16 и статью Дэвида Гелертера «Современное программирование» на с. 36).

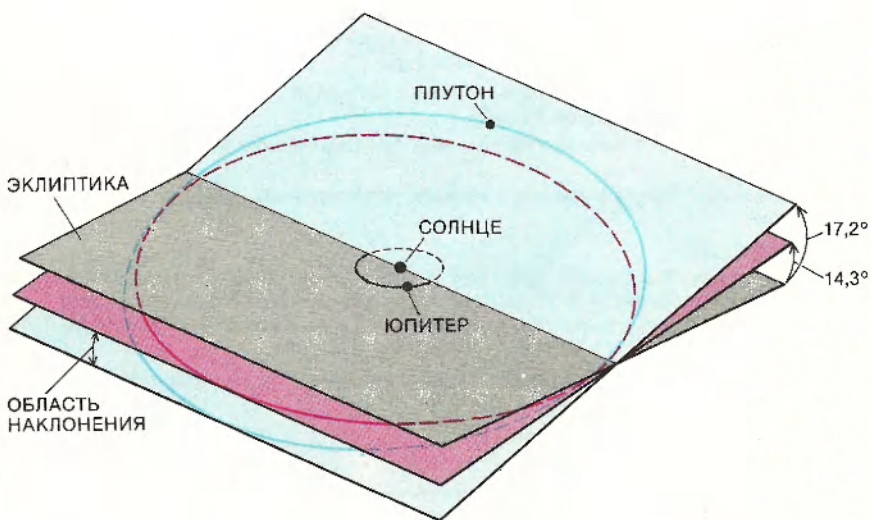
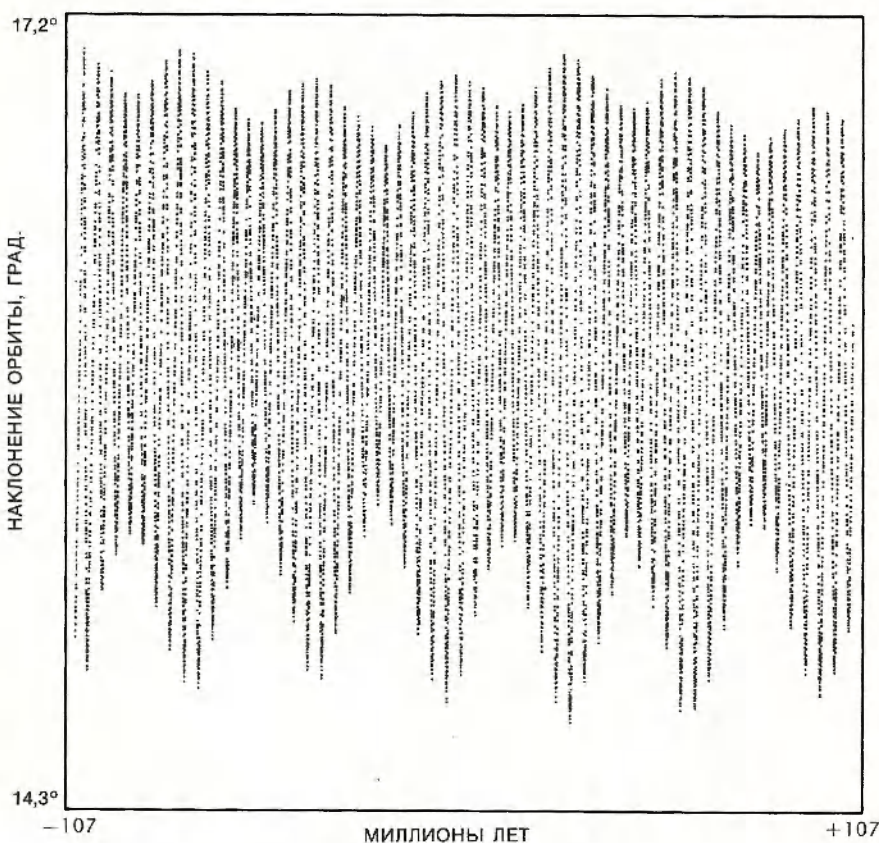
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ эксперимент, расширяющий границы познания, часто требует значительных ресурсов. Это связано со сложностью самого процесса машинного моделирования и большим числом необходимых экспериментов. На практике исследователи по традиции либо приобретают большие системы, либо арендуют на них машинное время. Оба способа весьма дороги. Эксплуатация больших компьютеров к тому же всегда сопряжена с преодолением административных преград. Нужно также учитывать, что, поскольку большие вычислительные системы часто плохо подходят для решения частных задач, разработка требуемых программ трудоемка и отнимает много времени. Разумеется, значительная часть этого времени уходит на поиск оптимальных алгоритмов, но реализация их на компьютере с заданной архитектурой не всегда может оказаться вполне возможной. Написание программ для решения, например, трехмерных задач гидродинамики на обычном компьютере может потребовать нескольких лет.

В значительной мере трудности разработки программ для больших компьютеров обусловлены универсальностью последних, которая заложена в архитектуру таких машин, предназначенных для решения широкого круга неоднородных задач. Напротив, специализированный компьютер может иметь простую архитектуру и малые габариты. Разработка такого компьютера может оказаться более простой задачей, чем создание программ для универсальной машины. Естественно стремление ученых и инженеров к сотрудничеству в разработке специализированных компьютеров для автоматизации научных исследований. Так, разработка машины для решения некоторых уравнений математической физики (уравнений в частных производных) может потребовать не больше времени, чем разработка соответствующих программ для суперкомпьютеров. Более того, специализированный компьютер становится обычной лабораторной установкой, принадлежащей разработавшей его группе сотрудников. Тем самым устраняются административные препоны и проблемы, связанные с использованием

дорогостоящей техники.

Совместная разработка специализированных компьютеров не ограничится несколькими случаями. Такой подход будет способствовать ради-

кальным изменениям в культуре научных расчетов. До сих пор ученые редко привлекались к созданию нужной им аппаратуры и вычислительная техника оставалась для них «чужой».



НАКЛОНЕНИЕ ОРБИТЫ ПЛУТОНА за период в 214 млн. лет определено с помощью компьютера «Диджитал Оррери» (вверху). Наклонение орбиты — это угол между плоскостью орбиты планеты и плоскостью эклиптики (внизу). На полученной диаграмме можно различить модуляцию (с периодом 34 млн. лет) основного изменения наклона с периодом 3,8 млн. лет; есть также указания на существование цикла с периодом 137 млн. лет.

Они были только пользователями, а поставщики этой техники ориентировались в основном на коммерческий рынок. Отныне ученые должны принять активное участие в создании собственного «компьютерного инструментария». Разработка компьюте-

ра — лишь один из инженерных аспектов в деле создания программного обеспечения и нужно только твердо усвоить, что проектирование специализированного компьютера — это обычная и необходимая часть деятельности, связанная с подготовкой

научного инструментария.

ТАКОЙ предвидимый в будущем подход аналогичен ситуации, сложившейся несколько лет назад в области проектирования сверхбольших интегральных схем (СБИС), в которых на одном полупроводниковом кристалле размещаются десятки и сотни тысяч схемных компонентов. В 1980 г. К. Мид из Калифорнийского технологического института и Линн Конвей (работавшая тогда в исследовательском центре фирмы Херох в Пало-Альто) создали кодекс правил проектирования СБИС. Тем самым они устранили ранее существовавшую в этой инженерной области «таинственность», позволив специалистам по архитектуре компьютеров самим проектировать нужные им СБИС. Предприятие MOSIS, явившееся детищем идей Мида и Конвей, строит свою технологию на строгом разделении проектирования и изготовления микросхем. Спецификацию требуемой схемы можно отправить в виде заказа на производство в центральное бюро MOSIS, где она будет изготовлена. Перечень услуг предприятия недавно расширился, в него включено производство заказных печатных плат; теперь большинство компонентов будущего компьютера можно изготовить «на расстоянии».

Примером специализированного компьютера для научных расчетов, созданного таким способом, является компьютер «Диджитал Оррери», разработанный одним из авторов данной статьи (Сассменом) с группой сотрудников. Этот компьютер был создан для решения задач устойчивости в динамике Солнечной системы. Машина оптимизирована для численного интегрирования с высокой точностью уравнений движения для небольшого количества тел, связанных гравитационным взаимодействием. Разработка и изготовление компьютера «Диджитал Оррери» были выполнены за один год группой из шести человек (три физика-теоретика, два инженера-электронщика и техник). Устройство имеет объем менее $0,3 \text{ м}^3$ и потребляет столько же энергии, сколько обычная электрическая лампочка (150 Вт). Для своего класса задач быстродействие этого компьютера в 60 раз выше, чем у компьютера типа VAX 11/780 с, снабженного ускорителем для операций с плавающей точкой. В настоящее время компьютер используется для исследования орбит в поясе астероидов с целью изучения механизма появления незанятых диапазонов орбит («промежутки Кирквуда»). Решается также задача исследования долгорочной устойчивости орбиты Плуто-

Ученый: Предлагаю рассмотреть галактику с полярным кольцом A0136—0801.

Компьютер: У меня имеются фотометрические профили и кривые вращения для этой галактики по данным Швейцера, Уайтмора и Рубин (из *Astron. J.*, Vol. 88, No 7, July, 1983). Вот они. [Допускается, что компьютер способен представлять данные в графическом виде.]

Ученый: Давайте смоделируем распределение массы в этой галактике в виде комбинации диска Миямото с усеченным изотермическим гало. Сначала подберем параметры диска Миямото, соответствующие измеренному фотометрическому профилю «веретена».

Компьютер: Метод наименьших квадратов в данном случае не обеспечивает хорошей аппроксимации. Вот все, что я могу сделать. [Опять появляется изображение на экране дисплея.]

Ученый: Проблема состоит в том, что полярное кольцо проходит через северо-западную часть «веретена», что приводит к уменьшению яркости. Видите, как профиль отклоняется на $-3'$? Вам нужно исключить аномальные данные из совокупности, используемой при подборе.

Компьютер: О'Кей. Методом наименьших квадратов я могу подобрать характерные размеры диска Миямото, лучше всего соответствующие измеренному фотометрическому профилю: 0,68 килопарсек по горизонтали и 0,92 кпс по высоте. Посмотрите, какое хорошее совпадение в области до $10'$.

Ученый: Теперь давайте подберем распределение массы по данным измерений кривой вращения.

Компьютер: Как я должен использовать данные о кривых вращения для полярного кольца? Похоже, что радиальные скорости при равных радиусах [внешнего ребра диска и внутреннего ребра кольца] одинаковы — Вы предполагаете, что эти наборы данных могут совпасть?

Ученый: Да, давайте попробуем этот способ.

Компьютер: На это потребуется какое-то время. У меня имеются три параметра, которыми я могу варьировать: масса «веретена»-диска, плотность в центре изотермического гало и радиус его ядра. Вы согласны ждать? Я сообщу, когда я получу удовлетворительный ответ.

[...Некоторое время спустя.]

Компьютер: Я нашел вариант неплохого совпадения. Масса диска $1,75 \cdot 10^{10}$ солнечных масс. Масса изотермического гало $9,26 \cdot 10^6$ солнечных масс в пределах до 16,9 килопарсек. Радиус ядра гало 8,17 килопарсек.

Ученый: Я не понимаю, почему радиус ядра так велик... Как вы рассчитывали изотермическое распределение?

Компьютер: Моя потенциальная функция пропорциональна $\log(R^2 + B^2)$ для радиуса ядра B .

Ученый: Похоже, что это не так; моя потенциальная функция содержит \arctg .

Компьютер: Тогда Ваша функция плотности имеет вид $\rho_0/(1 + R^2/B^2)$, верно?

Ученый: Да.

Компьютер: В этом все дело. Оба наших изотермических распределения имеют одинаковый асимптотический характер, но я вычисляю радиус ядра не так, как Вы. В единицах, которыми Вы пользуетесь, радиус ядра должен быть меньше, около 3 килопарсек.

Ученый: Неплохо. Какое же отношение массы к светимости для «веретена» мы получили?

Компьютер: Примерно пять.

ГИПОТЕТИЧЕСКИЙ ДИАЛОГ между компьютером и ученым-астрофизиком показывает, каким образом диалоговые системы будущего помогут разрабатывать, применять и анализировать теоретические модели. Авторы представляют систему, которая может вести диалог такого типа, хотя, возможно, язык диалога будет более формализованным. Важнейшей чертой этого гипотетического диалога является его концептуальный уровень: программа многое знает о задаче моделирования галактик.

на. С помощью этого компьютера определены орбиты внешних планет Солнечной системы в течение предыдущих и последующих 100 млн. лет.

До создания «Диджитал Оррери» высокоточное интегрирование для таких интервалов времени было недостижимым (слишком велики были требуемые затраты). Ставились лишь отдельные, не связанные между собой эксперименты с использованием труднодоступных ресурсов. Несмотря на очевидные преимущества специализированной машины, сама мысль о ее проектировании и создании противоречила традиционным взглядам астрофизиков. Предложение о разработке «Диджитал Оррери», направленное в отдел астрономических приборов Национального научного фонда США, было отклонено как неосуществимое. Такое отношение поражает, если учесть огромную сложность тех инженерных задач, которые были решены этими же людьми при постройке телескопов. Компьютер создать намного проще.

ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ эффективности вычислительных экспериментов нужны не просто эволюционные улучшения оборудования и программ. В распоряжение экспериментатора должен быть предоставлен компьютерный инструментарий. В нем нужны инструменты для разработки и проведения вычислительных экспериментов, базирующихся на знании качественных характеристик изучаемых явлений. Недостаточно, чтобы эти инструменты позволяли только подготовить исходные данные, обработать их и проанализировать полученные результаты; с их помощью ученый должен понять сущность самих вычислительных экспериментов и уяснить их связь с другими методами исследования.

Нет сомнения, что со временем появятся системы, в которых мощные численные методы будут сочетаться с изощренными методами символических преобразований как алгебраических, так и алгоритмических описаний. Инструментальное оснащение обеспечит преобразование данных в форму математических символов для автоматизированной подготовки, проведения и анализа результатов вычислительных экспериментов. Символические преобразования помогут манипулировать уравнениями динамики с целью приведения их к виду, удобному для моделирования и построения высококачественных моделирующих программ, оптимизированных применительно к частным случаям. Исследователь получит возможность обсуждать с компьютером модель галактики подобно тому, как

он сегодня обсуждает ее с коллегами. Мы верим в скорую осуществимость этих идей и создание систем, которые пока отсутствуют.

Новые инструменты часто привносили в цивилизацию такие изменения, которые создатели этих инструментов и не могли предвидеть; автоматизация вычислений уже переросла рам-

ки чисто численных методов. Символические преобразования, носящие качественный характер, становятся неотъемлемой частью процесса научного познания. В ближайшем будущем компьютеры перестанут быть «рабами» исследователя, «перемалывающими» числа, и станут его умелыми ассистентами.

Наука и общество

Причины близорукости

В ЧЕМ ПРИЧИНА миопии, или близорукости, — не в том ли, что человек слишком много читает? Многочисленные факты, накопившиеся за долгие годы наблюдений, позволяют предполагать, что так оно и есть; вспомним хотя бы, что у эскимосов близорукость появилась после введения обязательного обучения. Как показывают исследования, миопия связана с удлинением глаза, из-за чего лучи света от удаленных объектов фокусируются не на сетчатке, а перед ней. Но как сопряжены чтение и удлинение глаза?

Недавно Дж. Уоллмэн из Сити-Колледжа Нью-Йоркского городского университета с сотрудниками на основании результатов своих экспериментов с цыплятами выдвинули гипотезу, объясняющую удлинение. В статье, опубликованной в журнале «Science», эти исследователи сообщают, что если периферические участки сетчатки стимулируются недостаточно, то вследствие понижения активности нейронов соответствующие части глаза удлиняются и в результате весь глаз в целом становится «близоруким».

В опытах, проделанных группой Уоллмэна, только что вылупившимся цыплятам закрывали один глаз полупрозрачным пластиковым щитком (через него видно, как через шарик для пинг-понга: виден свет, но не различимы очертания предметов); второй глаз оставляли незакрытым для контроля. В одной группе животных глаз закрывали полностью, а в другой — частично. Измерения, проводившиеся в двух- и шестинедельном возрасте, показали, что у всех цыплят закрытый глаз увеличился и развилась близорукость. Однако между двумя группами животных была существенная разница. У тех цыплят, у которых глаз был закрыт частично, удлинение захватило лишь области, получившие неполную стимуляцию; у тех же, у которых глаз был закрыт полностью, он увеличивался равномерно. Уоллмэн сделал вывод, что миопия может

развиться не только вследствие процесса, затрагивающего весь глаз целиком — такого, как фокусирование, — но и вследствие локального контроля роста глаза, определяемого сетчаткой. Сходные результаты были получены в другом эксперименте: цыплятам перерезали зрительный нерв, и участки сетчатки, которые не получали стимуляции от мозга, вызвали локальный рост глаза.

Почему столь значим локальный рост? Как и только что вылупившиеся цыплята, новорожденные дети дальноворки: глаз слишком короткий для оптической силы хрусталика, и поэтому лучи света сходятся позади сетчатки. В процессе нормального развития длина глаза увеличивается и плоскость изображения сдвигается ближе к сетчатке. По гипотезе Уоллмэна, это удлинение контролируется различными участками сетчатки независимо. Если в данном участке сетчатки активность нейронов велика (как при ясном зрении), вещества — ингибиторы роста замедляют его. И наоборот, низкая активность нейронов вызывает секрецию стимуляторов роста.

Уоллмэн полагает, что при чтении периферические нейроны сетчатки не получают достаточной стимуляции, подобно тому как в опытах с цыплятами недостаточно стимулировались нейроны в участках, прикрытых полупрозрачным щитком. Нейроны, расположенные в центральной ямке сетчатки, реагируют на мелкие детали поля зрения, такие, как запятая над буквой «й». В процессе чтения различия в очертаниях букв и пробелов между ними обуславливают достаточный уровень активности нейронов в этой области. У периферических же нейронов сетчатки рецептивные поля по меньшей мере в 10 раз обширнее, поэтому для этих нейронов черные детали на белом фоне усредняются в равномерный неизменный серый тон. Уровень активности нейронов, не получающих стимуляции, на периферии сетчатки понижен и соответствующая часть глаза удлиняется, что ведет к миопии глаза в целом.

Вычислительные системы для медицины

*В будущем компьютеры станут столь же привычными
в медицинской практике, как сейчас стетоскоп.*

*Они смогут хранить и выдавать по запросу необходимую
информацию, а также оказывать помощь медицинскому персоналу
в вопросах диагностики и лечения*

ГЛЕНН Д. РЕННЕЛС, ЭДВАРД Г. ШОРТЛИФ

В ТЕЧЕНИЕ нескольких недель мисс Джонс чувствовала боли в пояснице. Постельный режим и аспирин не помогали. «Наверное, нужны обезболивающие средства», — подумала она и отправилась на прием к своему врачу по месту жительства в городе, куда недавно переехала. По ее словам, боли появились вскоре после того, как она поиграла в теннис впервые в этом сезоне. Осмотр выявил некоторую ограниченность подвижности левого локтевого сустава и болезненность при нажатии в области поясницы. Врач включил свой персональный компьютер и через действующую в стране сеть связи соединился с компьютером клиники в том городе, где ранее проживала мисс Джонс. В этом компьютере хранятся записи историй болезни, и лечащие врачи с разрешения своих пациентов могут ознакомиться с ними. Через несколько секунд врач узнал, что пять лет назад мисс Джонс удалили небольшую опухоль молочной железы. С тех пор она чувствовала себя превосходно и потому в своем разговоре с врачом не упомянула об этом.

Затем врач отсоединился от сети связи и обратился к консультационной системе QMR, содержащей в своей памяти подробные сведения о почти 600 заболеваниях. Система ответила, что в данном случае возможны артрит, растяжение мышц и рецидив рака с метастазами в нижние отделы позвоночника. Это подтверждало собственное мнение врача, и он направил больную на изотопное исследование костей, чтобы проверить подозрения на рецидив рака.

Подобная сцена на приеме у лечащего врача теперь уже не утопия. Мы думаем, что недалек тот час, когда врач будет считать компьютер таким же необходимым рабочим инструментом, каким сейчас является стетоскоп. Медицинские вычислительные

системы, которые в настоящее время начинают выходить за пределы исследовательских лабораторий, можно разделить на два типа: коммуникационные системы, которые хранят большие объемы информации, по запросам осуществляют ее поиск и по каналам связи передают данные запрашивающему, и консультационные системы, которые интерпретируют полученную и имеющуюся у врача информацию, чтобы помочь ему поставить диагноз или выбрать методику лечения, а затем следить за состоянием пациента и адекватно вести лечение.

В ПРЕДЫДУЩИХ статьях этого номера рассмотрены технические достижения, которые позволят в будущем сделать такие системы значительно более эффективными. Безусловно, более совершенные аппаратные средства существенно расширят возможности компьютеров, однако в ряде научно-исследовательских лабораторий, включая нашу в Медицинской школе Станфордского университета, основное внимание уделяется разработке программных методов, которые позволили бы накапливать нужную информацию, обрабатывать ее и выдавать необходимые данные врачам. В этой статье мы вначале на примере рассмотрим возможности и перспективы коммуникационных и консультационных медицинских систем, а затем обсудим некоторые фундаментальные проблемы, возникающие при разработке программного обеспечения для проведения анализа и оценки состояния здоровья конкретного пациента.

Потребность в коммуникационных системах возникла отчасти потому, что поток информации огромен и врачу или исследователю практически невозможно читать и запоминать все

необходимое для своей практической деятельности. Врач может месяцами и даже годами не сталкиваться с тем или иным заболеванием, а методы его диагностики и лечения могут тем временем измениться. По этим причинам врачи стали пользоваться информационно-поисковыми системами для обращения к базам библиографических данных. Примером является широко известная в США система MEDLINE. В большом компьютере, установленном в Национальной медицинской библиотеке в Бетесде, где была разработана эта система, хранятся библиографические описания почти всех статей по медико-биологической тематике, опубликованных за последние 25 лет, а также рефераты недавних и текущих публикаций. Каждая статья в базе данных MEDLINE снабжена продуманным индексом согласно списку ключевых слов и словосочетаний. Для поиска достаточно в запросе указать ключ по требующейся тематике, просмотреть названия найденных статей, а затем распечатать рефераты нужных работ. Уже имеются информационно-поисковые системы, которые содержат не только библиографические данные, но и полные тексты статей, в которых можно искать ключевые выражения.

По мере расширения функциональных возможностей компьютеров они будут играть все большую роль в доступе к медико-биологической литературе и базам данных по болезням и диагностике, сосредоточенным в библиотеках. Теперь библиотеки следует рассматривать не просто как физические хранилища книг и журналов, а как источники распространения информации. Такая точка зрения вовсе не исключает традиционного представления о библиотеке как об информационном центре, однако в наше время новых технологий эта роль уже

не ограничена физическим местом расположения библиотеки.

КОММУНИКАЦИОННЫЕ системы обеспечивают оперативный доступ к информации. Теперь разрабатываются консультационные системы, которые на основе хранящейся информации помогают решать конкретные задачи. Так, мы с коллегами работаем с экспериментальной консультационной системой ROUNDSMAN. Эта система является своего рода критиком: врач описывает стоящую перед ним проблему и свой план действий, а система ROUNDSMAN дает в ответ критический анализ этого плана.

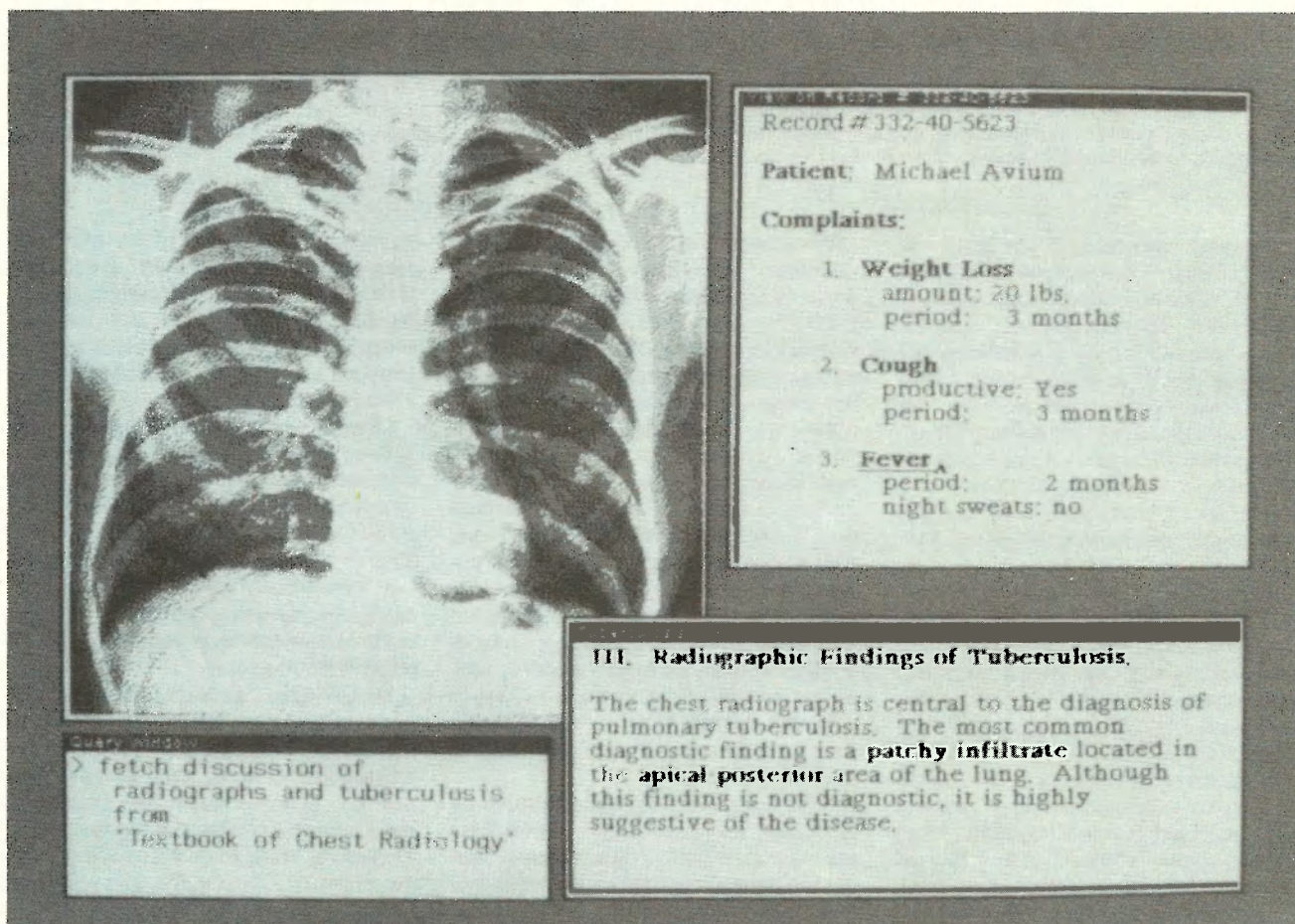
Главная задача такой системы — не

только обеспечить врача сведениями, содержащимися в публикациях, но и оценить значение имеющейся информации применительно к конкретному случаю клинической практики. В описанном выше примере с мисс Джонс система ROUNDSMAN уже при первом осмотре пациентки может дать индивидуальный для нее анализ возможных вариантов лечения рака молочной железы на основании 24 публикаций на данную тему.

Для этого вначале в компьютер вводится в закодированном виде информация, содержащаяся в публикациях. Например, «авторы Доу и Роу... журнал NEJM 1986... во всех изученных случаях лимфатические узлы удалялись и исследовались... 473

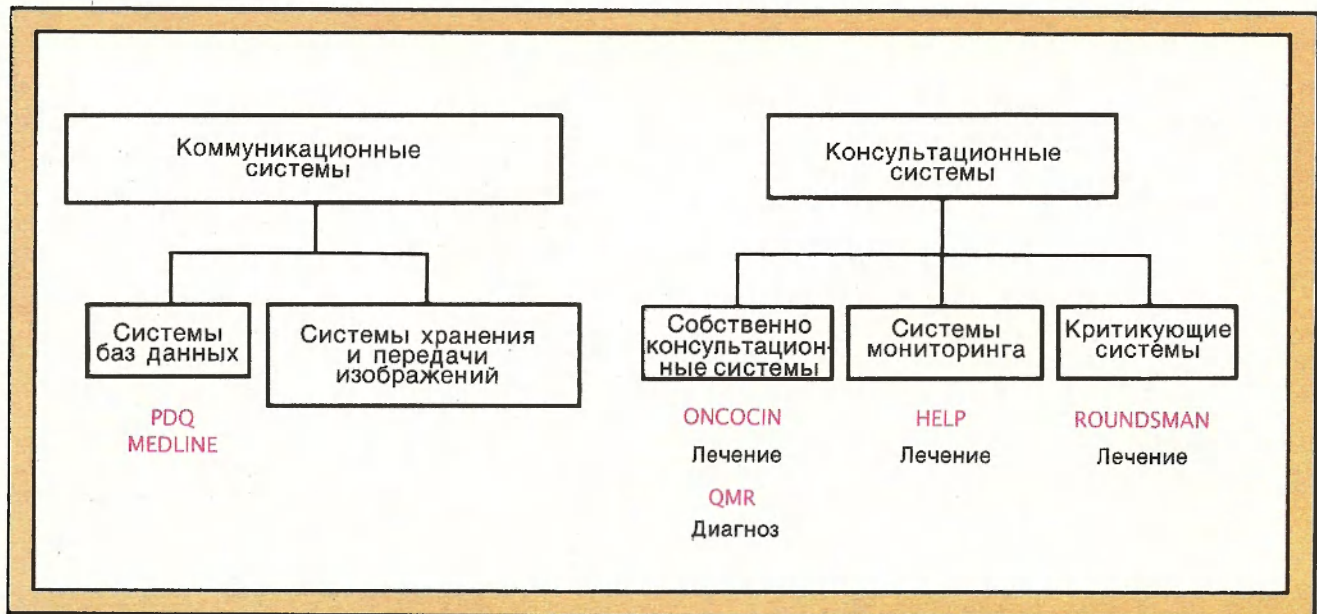
случая... были выбраны для лечения... 236 случаев мастэктомии... 237 случаев иссечения опухоли...» Подобным образом множество фактических данных о заболевании, методах его лечения и получаемых результатах вводится в ЭВМ.

Затем со всей собранной информацией знакомят экспертов, которые делают свои заключения и оценки. В качестве эксперта выбирается опытный врач, к какому коллеги обратились бы за консультацией по поводу трудных клинических случаев, когда нужно дать обоснованное и подробное заключение. Опрашивается большое число экспертов, и все их суждения вводятся в память системы, чтобы охватить возможно большее число



МЕДИЦИНСКАЯ РАБОЧАЯ СТАНЦИЯ позволяет получать прямо в кабинет врача данные рентгеновского анализа, историю болезни пациента и информацию из медицинских библиотек. Здесь показано, как выглядит на экране дисплея ответ информационной системы на запрос по конкретному случаю. По жалобам пациента врач предположил туберкулез и запросил справочную литературу о диагностике туберкулеза по рентгеновским снимкам. Слева внизу — окно запроса («найти описание рентгенографических признаков туберкулеза в «Руководстве по рентгенологическому исследованию грудной клетки»). Справа внизу — окно ответа, в котором показан соответствующий раздел руководства. («Рентгенологическая картина при тубер-

кулезе. Рентгенографическое обследование грудной клетки является основой в диагностике легочного туберкулеза. Наиболее обычный диагностический признак — пятнистый инфильтрат, расположенный в задне-верхушечном отделе легкого. Хотя этот признак недостаточен для диагноза, он с большой вероятностью указывает на заболевание.») Справа сверху — фрагмент истории болезни пациента [«регистрационный номер 332-40-5623. Больной: Майкл Эйвиум. Жалобы: 1) потеря веса — 8 кг за 3 мес.; 2) кашель с мокротой наблюдается 3 мес.; 3) повышенная температура наблюдается 2 мес., без ночного пота]. Слева сверху — рентгеновский снимок грудной клетки.



МЕДИЦИНСКИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ бывают коммуникационные и консультационные. Коммуникационные системы хранят информацию, осуществляют ее поиск и выдают библиографические описания, истории болез-

ней и другие данные. Консультационные системы дают рекомендации, помогающие ставить диагноз и проводить лечение. Цветом выделены системы, которые рассматриваются в этой статье.

различных ситуаций, о которых может быть запрошена система ROUNDSMAN. Например, эксперт указывает, что заключения, сделанные в данной работе, в отношении больных раком второй стадии следует применять с осторожностью, так как у больных, включенных в это исследование (лимфатические узлы поражены), состояние было хуже, чем в типичных случаях. Этот совет эксперта кодируется и вводится в память системы.

Что могла бы дать система ROUNDSMAN, когда у нашей гипотетической мисс Джонс впервые была обнаружена опухоль и она получила направление к хирургу? Хирург осмотрел бы больную, обратился к системе ROUNDSMAN, ввел в нее данные осмотра пациентки и свое предположительное намерение — удалить опухоль. Система ответила бы: «Роу и Доу в журнале "New England Journal of Medicine" в 1986 г. привели данные, указывающие на эффективность иссечения опухоли в подобных случаях, однако исследованная авторами выборка больных имела худший прогноз, чем ваша пациентка». После этого и ряда других сообщений система ROUNDSMAN отметит, что, несмотря на некоторое несоответствие исходных данных, намерение хирурга удалить опухоль оправданно.

РАЗЛИЧИЯ между программным обеспечением коммуникационных и консультационных медицин-

ских систем становятся понятными на примере сравнения возможностей двух экспериментальных систем — PDQ (Physician Data Query — информация для врача) и ONCOCIN. Обе системы работают с протоколами лечения онкологических больных. Протокол — это подробный план хода лечения, в котором определены конкретные формы хирургического вмешательства, курсы лучевой и химиотерапии, дозы медикаментов и облучения, расписание процедур. Он также содержит более дифференцированные рекомендации на случай осложнений и индивидуальных особенностей больного, например что делать, когда то или иное лекарство оказывает токсическое действие на пациента или когда тот или иной метод лечения не дает эффекта.

PDQ является коммуникационной системой и представляет собой базу данных, находящуюся в ведении Национального института рака и Национальной медицинской библиотеки; она обеспечивает врачей информацией о протоколах официальных клинических испытаний, недавно проведенных и текущих. Имея персональный компьютер и модем, врач может через телефонную линию получить доступ к центральному компьютеру и, пользуясь специальной программой, выбрать протоколы, подходящие для данного пациента. Протоколы обычно отражают новые подходы при лечении трудных случаев, и лечащий врач может сам применять их, если

только речь не идет об экспериментальных лекарственных средствах. Или же он может получить справку о ближайших больницах и специалистах, занимающихся применением в клинике выбранного метода лечения, и направить пациента к ним.

Предположим, что в случае мисс Джонс изотопное исследование подтвердило наличие опухоли в нижнем отделе позвоночника. Лечащий врач может с помощью системы PDQ получить справку о медицинских центрах, занимающихся новейшими методами лечения метастазирующего рака молочной железы, и направить пациентку в один из них.

Назначение системы PDQ — выдать на поступивший от врача запрос возможно больше релевантной информации. Однако она не способна помочь использовать эту информацию применительно к конкретному пациенту. Мы с коллегами разработали систему ONCOCIN, которая дополняет систему PDQ и практически помогает вести лечение больных раком. Система ONCOCIN включается в работу, когда врач уже выбрал протокол и начал курс лечения. ONCOCIN является одновременно и информационно-поисковой, и консультационной системой (на сегодняшний день она может охватить только небольшое число протоколов). В нее вводятся записи о ходе лечения и изменении состояния пациента. Система ONCOCIN может «подогнать» выбранный протокол к кон-

кретному случаю с учетом индивидуальности пациента.

Допустим, что в региональном онкологическом центре мисс Джонс был назначен новый курс химиотерапии. Во время каждого ее посещения клиники врачи, осуществляющие комплекс химиотерапевтических процедур, корректируют ход лечения с по-

мощью системы ONCOCIN. Она хранит данные всех анализов, следит за состоянием пациентки и устанавливает дозировку назначенных лекарств в соответствии с реакцией на них организма пациентки.

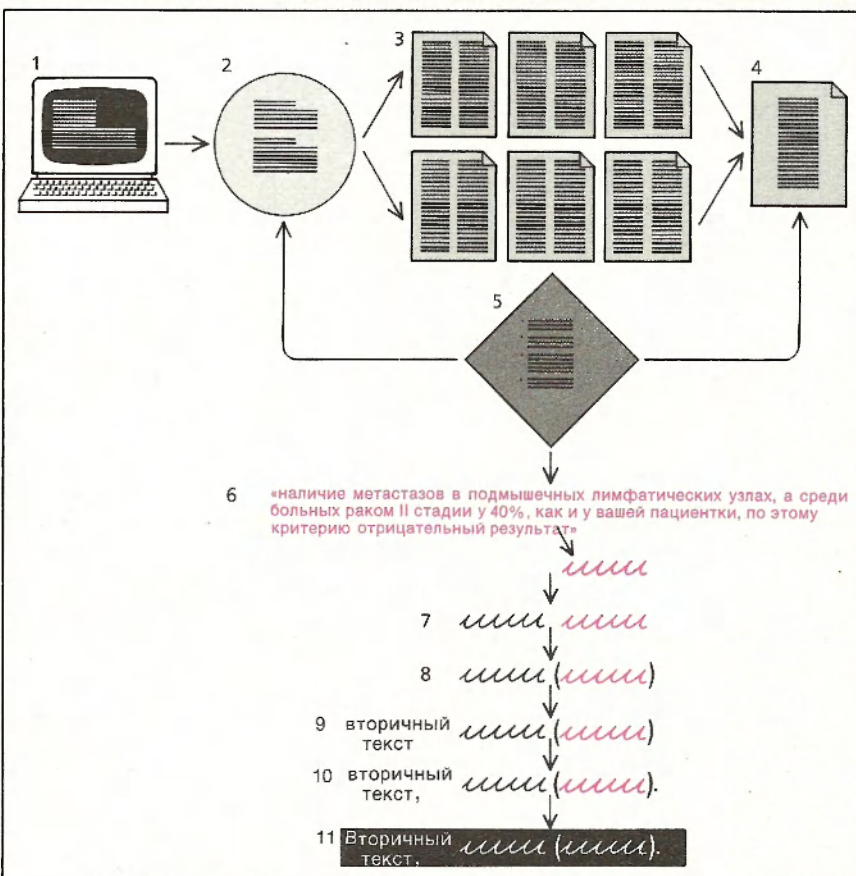
Детали протокола представлены в памяти машины в виде структур данных, известных под названием

правил вывода. Например, правило вывода может гласить: «Если содержание лейкоцитов у пациента ниже нормы, но превышает 3000 клеток на 1 мм^3 , то следует ввести лекарство А, но лишь 75% обычно используемой дозы». Подобные правила позволяют системе ONCOCIN давать рекомендации, корректирующие курс

СИСТЕМА ROUNDSMAN дает критические комментарии к плану лечения, предлагаемому врачом. Система находит в опубликованных статьях соответствующие места и выводит на дисплей эти выдержки и их интерпретацию применительно к данному конкретному случаю [вверху: «...клиническое испытание, проводившееся в нескольких медицинских центрах. Больные случайным образом были разделены на две группы. По первому протоколу курса лечения проводилось широкое иссечение опухоли (и подмышечных лимфатических узлов), облучение и адъювантная химиотерапия (N = 229). По второму протоколу производилась тотальная мастэктомия и назначалась химиотерапия (N = 224). В первой группе общая выживаемость за 5 лет 0,75, в том числе без рецидивов 0,58; во второй группе эти показатели 0,66 и 0,58 соответственно. Как эти данные относятся к вашему случаю? Воздействие несколько отличается от общепринятого (не облучались надключичные лимфатические узлы), но это не очень существенно. Важнее два обстоятельства. Во-первых, если после иссечения опухоли находили опухолевую ткань по краю разреза, больной удаляли грудь целиком, но при учете результатов ее относили по-прежнему к первой группе. Во-вторых, все пациентки относились к категории с худшим прогнозом, чем ваша больная (наличие метастазов в подмышечных лимфатических узлах, а среди больных раком II стадии у 40%, как и у вашей пациентки, по этому критерию отрицательный результат)»]. Внизу схематически показан процесс, приводящий к выдаче последнего предложения этого примера. Врач вводит описание состояния больного и свой план лечения (1). Система помещает эти данные в «клинический контекст» (2), осуществляет поиск относящихся к нему опубликованных данных (3) и выделяет в них подходящие участки текста (4). Затем она запрашивает базу знаний на предмет экспертной оценки (5) с целью усиления клинического контекста. Одна из выданных на запрос фраз (6) становится элементом возникающего текста. Система вставляет перед ней текст общего содержания (7), берет в скобки частности (8), добавляет «вторичный текст», чтобы сформировать больший кусок распечатки (9), расставляет знаки препинания и прописные буквы (10) и, наконец, показывает результат на экране (11).

investigators at multiple NSABP centers. Patients were randomized to wide excision (& axillary dissection) and adjuvant radiotherapy and adjuvant chemotherapy (N= 229) or another protocol which was total mastectomy (& axillary dissection) and adjuvant chemotherapy (N= 224). For patients who underwent the first protocol the overall survival at five years turned out to be 0.75 and recurrence-free survival at five years was equal to 0.58. Under the second protocol the overall survival at five years was 0.66 and recurrence-free survival at five years was equal to 0.58.

How do these data apply to your patient? We are not particularly concerned that the intervention was somewhat nonstandard (they did not radiate supraclavicular nodes). More troublesome is that first, there were modifications to one intervention (in the excision arm, women with positive margins received total mastectomy, but remained in the 'excision' group). Second, the study population was in a worse prognostic stratum compared to your patient (this study stratum was defined by positive axillary node histology; about 40% of clinical stage II patients like yours will have negative histology).



Cover Sheet											
Hass / X-ray											
Disease Activity											
Hematology	WBC x 1000	7.6	8.0	4.0	3.5	6.4	6.3	6.2	5.1	3.3	7.8
	% polys	54	24								
	% lymphs	20	30								
	PCV	32.8	33.9	27.2	27.3	27.6	25.7	26.5	24.3	30.6	
	Hemoglobin	11.1	11.4	9.1	8.4	9.5	8.8	8.3	8.2	10.4	
	Platelets x 1000	300	244	296	294	42	81	141	323	241	260
	Sed. Rate										
CHEMOTHERAPY (non-cytotoxic drugs)	BSA (m2)										
	Arm assignment										
	Combination Name	POCC	VAM	POCC	POCC	VAM	VAM	VAM	POCC	POCC	
	Cycle #	1	2	3	2	3	3	3	3	3	
	Subcycle	B		A	B				A	B	
	Visit type	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT	DELAY	DELAY	TREAT	TREAT	TREAT	
	Procarbazine (100MG/M2)x4	200		200	200				200	200	
	Ureteridazole (1.5MG/M2)x1	2.0		1.5	2.0				2.0	2.0	
	Cytosine (600MG/M2)x1	1300		1300	1300				1300	1300	
	CCNU (60MG/M2)x1			130	0				130		
	VP16 (65MG/M2)x3		170					130			170
	Adriamycin (60MG/M2)x1		110					80			110
	Methotrexate (30MG/M2)x1		65					45			65
	Cum. Adriamycin		230.0					310.0			420
	Radiotherapy										
Symptom Review											
Toxicity											
Physical Examination											
Chemistry											
To order: Labs and Procedures											
To order: Nuclear Medicine and Tomography											
Scheduling											
Time	Day	6	27	20	31	24	1	6	29	5	26
	Month	Feb	Feb	Mar	Mar	Apr	May	May	May	Jun	Jun
	Year	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

лечения по ходу дела в зависимости от состояния пациента, а при необходимости требовать тех или иных дополнительных анализов. Система оснащена высококачественным дисплеем, на котором отображается бланк с описанием состояния пациента привычной для врачей-онкологов формы (данные о пациенте и ходе лечения располагаются в клетках определенным образом разграфленной «карточки»). Система ONCOCIN дает свои рекомендации, заполняя соответствующие позиции бланка. Если у врача возникает вопрос или сомнение, ONCOCIN может объяснить, как был сделан вывод предлагаемого ею варианта на основе логики протокола, хранящегося в виде правил вывода в программе. Безусловно, врач волен пренебречь советом системы, ведь ни одна компьютерная программа не может «знать» все имеющиеся значение факты, которые следует учитывать, принимая решение по поводу лечения конкретного пациента. Если врач, использующий систему, имеет дополнительную информацию о пациенте, то он может ввести эти данные в систему ONCOCIN для более адекватного анализа всей совокупности данных, содержащихся в системе ONCOCIN.

Хотя основные научно-исследовательские проблемы, возникающие при создании систем типа ROUNDSMAN и ONCOCIN, относятся к программному обеспечению (некоторые из них рассмотрены ниже), совершенствование аппаратных средств на основе, скажем, использования более быстрых процессоров и большей по объему оперативной памяти, безусловно, будет способствовать широкому внедрению подобных систем в практику здравоохранения. Например, в настоящее время в оперативной памяти компьютера может находиться довольно ограниченное число протоколов. Если протокол лечения пациента не записан в оперативную память, то машина должна считать недостающие данные с магнитного диска, заменив ими в памяти ранее хранившийся протокол. Это сравнительно медленный процесс, что создает неудобства при использовании системы в клинической практике. Разрабатываемые в настоящее время интегральные схемы памяти позволяют существенно сократить число подобных обменов с диском и ускорят реакцию системы на запрос.

Cover Sheet											
Hass / X-ray											
Disease Activity											
Hematology	WBC x 1000	7.6	8.0	4.0	3.5	6.4	6.3	6.2	5.1	3.3	7.8
	% polys	54	24								
	% lymphs	20	30								
	PCV	32.8	33.9	27.2	27.3	27.6	25.7	26.5	24.3	30.6	
	Hemoglobin	11.1	11.4	9.1	8.4	9.5	8.8	8.3	8.2	10.4	
	Platelets x 1000	300	244	296	294	42	81	141	323	241	260
	Sed. Rate										
CHEMOTHERAPY (includes non-cytotoxic drugs)	BSA (m2)										
	Arm assignment										
	Combination Name	POCC	VAM	POCC	POCC	VAM	VAM	VAM	POCC	POCC	VAM
	Cycle #	1	2	3	2	3	3	3	3	3	4
	Subcycle	B		A	B				A	B	
	Visit type	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT	DELAY	DELAY	TREAT	TREAT	TREAT	TREAT
	Procarbazine (100MG/M2)x4	200		200	200				200	200	
	Ureteridazole (1.5MG/M2)x1	2.0		1.5	2.0				2.0	2.0	
	Cytosine (600MG/M2)x1	1300		1300	1300				1300	1300	
	CCNU (60MG/M2)x1			130	0				130		
	VP16 (65MG/M2)x3		170					130			170
	Adriamycin (60MG/M2)x1		110					80			110
	Methotrexate (30MG/M2)x1		65					45			65
	Cum. Adriamycin		230.0					310.0			420
	Radiotherapy										
Symptom Review											
Toxicity											
Physical Examination											
Chemistry											
To order: Labs and Procedures											
To order: Nuclear Medicine and Tomography											
Scheduling											
Time	Day	6	27	20	31	24	1	6	29	5	26
	Month	Feb	Feb	Mar	Mar	Apr	May	May	May	Jun	Jun
	Year	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

СИСТЕМА ONCOCIN дает свои рекомендации в виде «электронного бланка»: верхний — этап сбора данных, нижний — этап консультации. Открыты два экранных окна — по химиотерапии и гематологии; другие могут быть выданы по запросу. Врач ввел данные о составе крови по состоянию на 26 июня (вверху). Учитывая эти данные, протокол лечения, состояние больного и ранее проводившиеся лечебные мероприятия, ONCOCIN рекомендует дозу лекарства (внизу). В зависимости от состояния пациента система меняет дозировку и расписание приема лекарства.

КАК ВИДНО из описания систем ROUNDSMAN и ONCOCIN, характер взаимодействия консультантской системы и пользователя может быть различным в зависимости от специфики системы. Выше отмеча-

лось, что ROUNDSMAN является критикующей системой: она анализирует мнение врача — предполагаемый путь лечения или предварительный диагноз — и, если необходимо, дает другие решения. А собственно консультационная система проводит анализ и выдает свои рекомендации независимо от предложений и мнений врача по данному конкретному случаю. Если система ONCOCIN предлагает путь лечения, то консультационная система QMR (Quick Medical Reference — быстрая медицинская справка), упомянутая в самом начале статьи, выдает предварительный диагноз.

Система QMR представляет собой адаптированный для микрокомпьютера вариант большой диагностической программы INTERNIST-1, созданной в Медицинской школе Питтсбургского университета. Система содержит сведения о 577 заболеваниях и их взаимосвязи с признаками, симптомами и другими характеристиками пациента, общее число которых достигает 4100. В клинических целях систему QMR можно использовать тремя способами.

Во-первых, QMR выполняет роль экспертной консультационной системы, которая осуществляет предварительную диагностику применительно к конкретному пациенту на основании заложенных в ней данных. При этом она определяет как часто данный набор характеристик встречается при том или ином заболевании; как часто при данном заболевании наблюдаются те или иные симптомы. Система может запросить не хватающие ей для заключения сведения, может указать, какие нужны для постановки диагноза дополнительные анализы. Затем она обобщает всю полученную информацию и выдает один или несколько наиболее вероятных диагнозов. Эта роль QMR — основная.

Во-вторых, система QMR может служить электронным справочником и по запросу выдавать список характерных симптомов, наблюдаемых при данном заболевании, или, наоборот, список болезней, которые могут быть связаны с имеющимися у пациента симптомами. В-третьих, система QMR как электронный медицинский бланк позволяет комбинировать симптомы и болезни, давать прогноз с учетом их сочетания. Например, можно ввести два не связанных на первый взгляд друг с другом симптома и получить заключение о том, какое сочетание заболеваний при соответствующих обстоятельствах вызовет указанные в запросе симптомы.

Предшественник QMR — система INTERNIST-1, функционирующая на большой ЭВМ, при постановке диа-

гноза в трудных случаях действовала на уровне специалистов высшей медицинской квалификации. Система QMR имеет ту же, что и у INTERNIST-1, базу знаний и диагностические возможности; к ним добавлены режимы электронного справочника и средства «электронных бланков». В настоящее время система QMR проходит опытную эксплуатацию в Питтсбургском университете и ряде сотрудничающих с ним медицинских учреждений.

ЧТОБЫ консультационная система, подобная QMR, не простаивала в ожидании врача-пользователя

и чтобы он повторно не вводил вручную данные о пациенте, которые уже хранятся на магнитных дисках базы данных, необходима ее интеграция с коммуникационной системой. Коммуникационная система может автоматически находить данные, нужные для анализа, каждый раз, когда это необходимо. Одна из первых интегрированных клинических информационных систем такого рода под названием HELP (помощь) была разработана в США около 15 лет назад в больнице города Солт-Лейк-Сити.

Система HELP функционирует на базе центрального компьютера клиники и соединена с многочисленными

Associations List

Pulmonary Disease and DIARRHEA Chronic

Pairs of Diseases consistent with Entered Finding and Topic

Atelectasis
caused-by Carcinoid Syndrome Secondary To Bronchial Neoplasm

Eosinophilic Pneumonia Acute <LOEFFLER>
caused-by Hookworm Disease

Pulmonary Legionellosis
predisposed-to-by Immune Deficiency Syndrome Acquired <AIDS>

Pleural Effusion Exudative
caused-by Pancreatic Pseudocyst

Pneumococcal Pneumonia
predisposed-to-by Carcinoid Syndrome Secondary To Bronchial Neoplasm

Pneumocystis Pneumonia
predisposed-to-by Immune Deficiency Syndrome Acquired <AIDS>

Pulmonary Hypertension Secondary
caused-by Progressive Systemic Sclerosis
or co-occurring-with Schistosomiasis Chronic Hepatic

Pulmonary Infarction
predisposed-to-by Carcinoma Of Body Or Tail Of Pancreas
or predisposed-to-by Carcinoma Of Head Of Pancreas
or caused-by Hepatic Vein Obstruction

Pulmonary Lymphoma
coinciding-with Lymphoma Of Colon
or coinciding-with Small Intestinal Lymphoma

Pulmonary Interstitial Fibrosis Secondary Diffuse
caused-by Progressive Systemic Sclerosis

СИСТЕМА QMR по запросу распечатала список болезней, которые могут сопровождаться двумя на первый взгляд не связанными проявлениями — заболеванием легких и хроническим расстройством пищеварения. Здесь показан только фрагмент полного ответа, данного QMR на основании анализа базы знаний, включающей сведения о 577 болезнях и 4100 показателях состояния больного в связи с их отношением к той или иной болезни. (В приведенном списке перечислены следующие заболевания: ателектаз, обусловленный карциноидным синдромом при новообразованиях легкого; острая эозинофильная пневмония (синдром Леффлера), обусловленная анкилостомозом; легочный легионеллез, связанный с синдромом приобретенного иммунного дефицита; плевральный выпот, обусловленный псевдокистой поджелудочной железы; пневмококковая пневмония, связанная с карциноидным синдромом при новообразованиях легких; пневмоцистная пневмония, связанная с синдромом приобретенного иммунного дефицита; вторичная легочная гипертензия, обусловленная прогрессирующим коллагенозом или сопутствующая хроническому гепатиту, вызываемому шистосомой; инфаркт легкого, связанный с раком тела или хвоста либо головки поджелудочной железы или обусловленный закупоркой печеночной вены; лимфома легкого при одновременной лимфоме ободочной кишки или тонкой кишки; вторичный интерстициальный фиброз легкого, обусловленный прогрессирующим коллагенозом.)

ПРАВИЛО		
При определении дозы метотрексата при химиотерапии VAM, согласно протоколам 20-83-1 и 2091, следует учитывать:		
Если: уровень креатинина в сыворотке превышает 1,5 мг/дл		
То: не назначать метотрексат		
ФРЕЙМ		
Заболевание: туляремия	Весовые коэффициенты	
Симптомы и признаки:	инициирующий фактор	частота
лихорадка	0	5
наличие <i>Francisella tularensis</i> в культуре клеток кожи	5	4
лимфатические узлы увеличены	1	4
изъязвления кожи	1	4
синусовая тахикардия на ЭКГ	0	4
положительная реакция кожи на присутствие возбудителя	4	3
контакт с кроликами, грызунами, мелкими млекопитающими	2	3
укусы клеща в период, предшествующий заболеванию	2	3
сильная головная боль	1	3
Может вызывать:		
пирогенный шок	1	2
острый аппендицит	1	1
Предрасполагает к:		
острому инфекционному эндокардиту левого предсердия и желудочка сердца	1	1

ПРАВИЛА И ФРЕЙМЫ — две основные структуры представления медицинских знаний. Правила имеют вид «если х, то у». Когда система ONCOCIN, в которой данные структурированы по первому принципу, определяет дозу лекарства, она устанавливает истинность условия «если» и в зависимости от результата формирует «то» (вверху; VAM — сокращение от винкристина [V], адриамицина [A], метотрексата [M]). Фреймы содержат описание болезней и симптомов. В системе QMR со вторым видом структуры данных фрейм заболевания туляремия (внизу) включает весовые коэффициенты, количественно характеризующие связь этого заболевания с различными симптомами, признаками и другими болезнями. «Иницирующий фактор» отражает вероятность той или иной болезни при наличии данного симптома: 0 — симптом не специфичен, 5 — симптом имеет место только при данной болезни. «Частота» указывает вероятность появления данного симптома при той или иной болезни: 1 — очень редко, 5 — почти всегда.

распределенными по клинике терминалами и печатающими устройствами — принтерами. Сейчас на каждый пост дежурной сестры приходится не менее четырех терминалов и принтер. Кроме того, в палатах интенсивной терапии терминалы установлены у каждой койки. В перспективе планируется поставить по терминалу у всех 520 коек клиники. Центральный компьютер прежде всего выполняет функцию управления базами данных; в нем для каждого пациента клиники хранятся история болезни, записи о проводившихся медицинских процедурах, результаты лабораторных анализов и текущие сведения о состоянии. Помимо этой основной функции центральная ЭВМ имеет тысячи специальных логических подпрограмм, называемых в системе HELP секторами. Их назначение — следить за всеми поступающими данными о пациенте и обнаруживать так называемые ситуации тревоги. Как только выявлена такая ситуация, система выдает предупреждающее сообщение дежурному медицинскому персоналу.

Когда наша гипотетическая мисс Джонс была госпитализирована для

удаления той первой опухоли молочной железы, система HELP могла бы следить за ее лечением, результатами лабораторных анализов и показателями состояния (пульсом, дыханием и т. п.). В отличие от врача сбор и анализ данных система HELP осуществляет практически мгновенно и непрерывно ночью и днем. Допустим, мисс Джонс был назначен препарат дигоксин для улучшения сердечной деятельности. Однако при лабораторном анализе крови обнаружилось низкое содержание калия. В этом случае система HELP предупредит дежурную медсестру о том, что прием дигоксина при низком содержании калия в крови опасен и что пациентке следует дополнительно принимать раствор хлористого калия.

Система HELP — превосходный пример того, как гибкость и эффективность консультационной системы могут быть приумножены путем интеграции с коммуникационной системой. Создание подобных интегрированных систем в медицине только начинается. Быстро совершенствующаяся технология локальных сетей связи сделает возможным расширение мас-

штабов использования информационных систем в клинике за счет того, что локальная сеть объединит консультационные системы типа ROUNDSMAN, диагностические системы и системы передачи изображений (рентгеновских снимков, результатов эхографии и компьютерной томографии) на цифровые графические терминалы, расположенные в операционной или у постели больного.

ПОЧЕМУ ЖЕ, несмотря на очевидные преимущества и доступность, экспериментальные варианты компьютерных медицинских систем не получили широкого распространения в клинической практике? Дело в том, что методология проектирования и создания консультационных систем пока несовершенна и при разработке эффективных программных средств возникают значительные теоретические и практические трудности, имеющие фундаментальный характер.

Основным элементом большинства консультационных систем является некая модель опыта и квалификации, а именно процесса принятия решения врачом. Как следует моделировать эту специфическую человеческую способность делать заключения и выводы исходя из неполных и порой противоречивых данных? Существует много разнообразных стратегий, основанных на использовании таких подходов, как распознавание образов, статистическая регрессия, ветвящиеся алгоритмы, теория принятия решений. Следует особо выделить подход, заключающийся в применении методов искусственного интеллекта (ИИ); на его примере становятся ясны трудности, с которыми сталкиваются разработчики программного обеспечения консультационных систем.

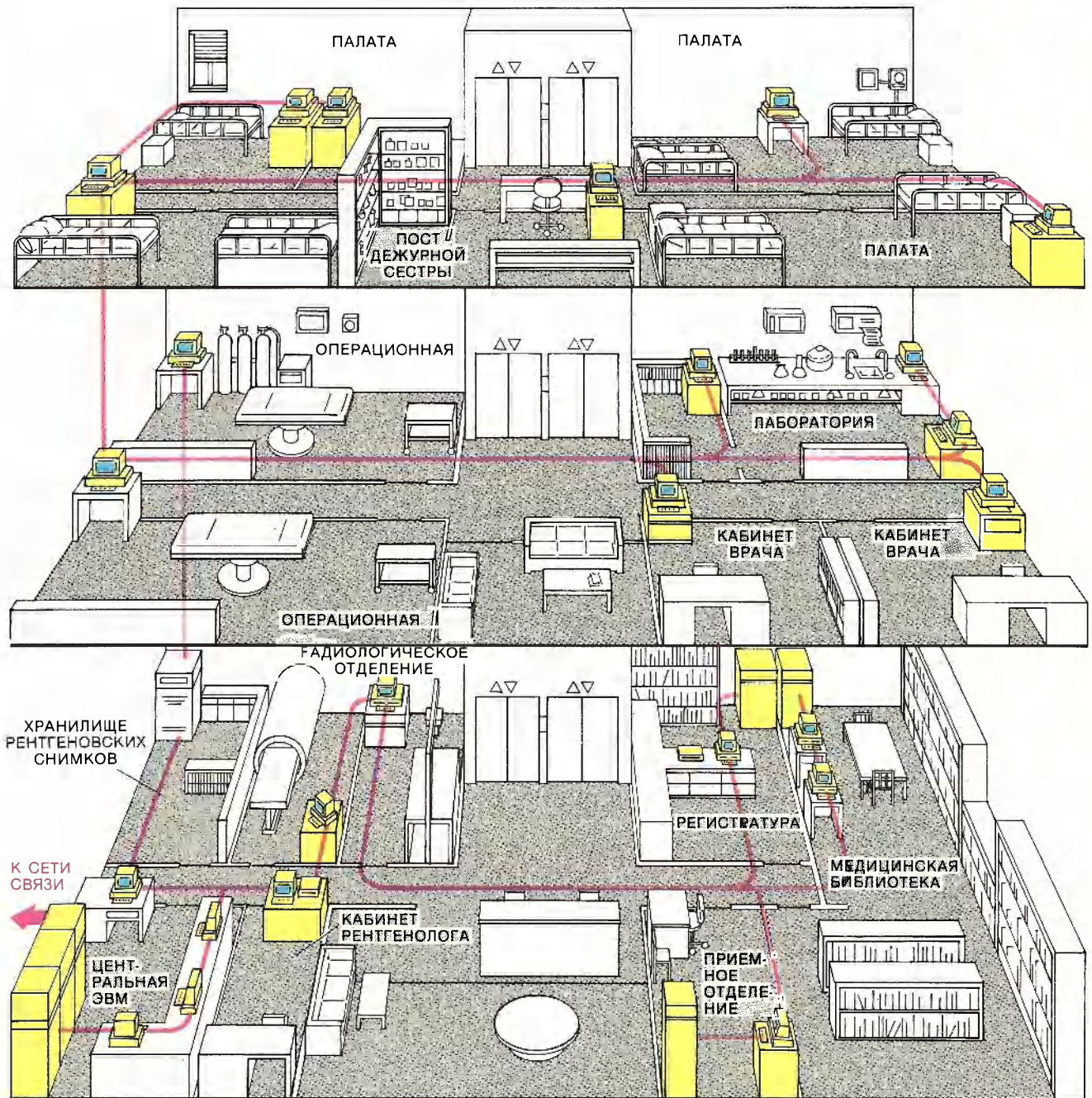
На изыскания в области медицинских ИИ-систем сильно повлияли некоторые исследования по экспериментальной психологии, подразумевающие, что опытный врач выделяется не каким-то особым умением обрабатывать информацию, а прежде всего богатством специальных знаний, т. е. хранящихся в его памяти сведений о болезнях, симптомах и методах лечения. Компьютерные системы, использующие технику искусственного интеллекта для представления и манипулирования подробными сведениями в какой-либо области знаний, известны под названием «экспертные системы». При создании экспертных ИИ-систем медицинского назначения важно прежде всего найти оптимальный способ представления специальных знаний внутри компьютера. Медицинская экспертная систе-

ма основывается на объеме заложенных в компьютере знаний и их упорядоченности, а не на каких-то новых алгоритмах обработки данных, которые якобы присущи человеку.

ПЕРВАЯ трудность в создании экспертных систем заключается в обеспечении достаточной полноты

информации, заносимой в память. Например, в системе QMR хранятся данные о 577 болезнях и 4100 показателях состояния больного. Когда все эти 4677 единиц хранения рассматриваются во взаимосвязи друг с другом и с учетом их относительных весов (чтобы показать, что определенные симптомы предполагают определен-

ные болезни, или что одно заболевание может вызвать другое, или что одни показатели состояния пациента важнее других), то получается, что база знаний системы может содержать около 250 тыс. элементов знаний. Притом большая часть их в явном виде не значится ни в одном медицинском учебнике. Для того чтобы



ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА в клинике будущего, используя локальную сеть связи, передает тексты и изображения к рабочим станциям, расположенным по всей больнице. Информация о пациенте вводится (и передается) в приемном отделении, в лабораториях, регистратуре, операционных и палатах. Данные рентгенографии, компьютерной томографии, эхографии и других исследований хранятся в цифровой форме и по запросам передаются по световодам в любое место клиники. Система обеспечивает

доступ к информации из медицинских библиотек. С помощью широкой сети связи врачи получают доступ к дистанционно удаленным базам данных и консультационным системам. Сегодня информационные системы базируются на больших компьютерах, однако в перспективе основные ресурсы памяти и обработки данных будут децентрализованы и рассредоточены по персональным рабочим станциям. Прототипом изображенной здесь системы может служить уже функционирующая система HELP.

эти производные элементы базы знаний были представлены в системе достаточно конкретно и ясно, потребовалось 10 лет совместной работы специалистов по вычислительной технике и медиков. При этом следует учесть, что система QMR располагает сведениями не о всех заболеваниях.

Одной из центральных задач при проектировании экспертной системы, стало быть, является выделение ключевых элементов знаний и установление их взаимосвязей в структуре данных, а также использование такой системы кодирования, которая позволила бы эффективно применить эту информацию к решению практических задач, стоящих перед лечащим врачом.

Вторая трудность в разработке экспертных систем — это необходимость использовать для представления элементов знаний такие структуры данных, которые бы позволяли в дальнейшем добавлять новые и корректировать старые элементы знаний. Открытия в области медицины приводят к изменениям в клинической практике, поэтому системы, базирующиеся на ограниченном объеме знаний, непременно должны быть способными к оперативному включению новых сведений в базу знаний. Внесение всякий раз поправок непосредственно в текст больших работающих программ неэффективно и дорого. Поэтому структура данных (будь то список, иерархия, сеть или какая-либо иная структура) в идеале должна быть полностью независимой от алгоритмов их обработки. На деле полную независимость достигнуть трудно, поскольку медицинские знания сами по себе могут быть алгоритмическими, например когда представляют собой не отдельные факты или связи между ними, а стратегию решения проблемы. Так, при постановке диагноза врач часто старается сначала определить патологический процесс в общем виде, скажем «болезнь печени», и только затем устанавливает, какое это конкретно заболевание.

Кроме того, каждый элемент медицинских знаний следует представлять в модульной форме, т. е. так, чтобы при изменениях и дополнениях одного из элементов другие элементы базы оставались неизменными. Существуют две структуры данных, которые позволяют добиться такой модульности в представлении элементов базы знаний: правила и фреймы. Правило — это логическое умозаключение вида «если А, то тогда Б». С помощью списков, составленных из таких правил, система может делать выводы, используя логическое преобразование, известное в математичес-

кой логике как *modus ponens*: если из А следует Б и известно, что А истинно, то делается вывод, что Б истинно. Результат такого логического вывода может быть использован в другом правиле, чтобы сделать следующий вывод. Таким образом, правила динамически «собираются в цепочки». Структура, называемая фреймом, представляет каждую единицу хранения как единый объект и характеризует его набором слотов. Если, например, единицей хранения является некоторая болезнь, то слотами будут ее симптомы. Вместе с фреймами определяются правила вывода значений слотов через другие характеристики данного фрейма или через другие фреймы.

Модульность, обеспечиваемую правилами и фреймами, на практике бывает принципиально трудно достигнуть частично из-за того, что медицинские знания — это нечто большее, чем просто сумма сведений. Например, в системе *ROUNDSMAN* каждая журнальная статья представляется как отдельный объект в базе знаний. Когда публикуется новая статья, следует дополнить базу знаний в соответствии с ее модульным построением. Однако приведенная в этой статье информация по-новому освещает предыдущие работы, что изменяет их интерпретацию и смысл. И чем больше пытаются учесть немодульный аспект медицинских знаний (например, путем добавления новых связей между объектами для представления взаимоотношений отдельных статей), тем запутаннее делается структура базы знаний, тем жестче связываются ее элементы и постепенно она становится «непроходимой» к добавлению новых элементов и установлению их связей со старыми знаниями.

Третья трудность в разработке экспертных систем заключается в том, что современная медицина располагает далеко не полными представлениями о функционировании человеческого организма и о различных заболеваниях, и поэтому их моделирование ограничено. Эта ситуация резко отличается от той, которая складывается при создании компьютерных систем, предназначенных для управления производственными процессами. При изготовлении промышленных изделий имеется ясное понимание функций каждой детали в отдельности и их взаимосвязи в собираемом изделии. Проблемы, возникающие при сборке изделия и выявлении неисправных узлов, часто можно решить путем рассмотрения различных комбинаций в последовательности сборки или в потенциальных причинах вы-

хода из строя отдельных узлов.

В человеческом организме лишь некоторые структуры и их функции полностью понятны на таком механистическом уровне. Поэтому врачам в их практике нужен очень широкий набор знаний, включая и эмпирические правила, выработанные на собственном опыте лучшими специалистами, и результаты статистического анализа клинических испытаний, и причинно-следственные связи, вытекающие из данных анатомических, физиологических и молекулярно-биологических исследований, а также вопросы социальной сферы, имеющие отношение к медицинской помощи. Главной задачей в создании медицинских компьютерных систем является представление всех этих разнообразных знаний в таком виде, чтобы можно было их целенаправленно использовать при решении конкретных клинических задач.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ и конструкторские задачи, решаемые разработчиками консультационных систем, принципиально отличаются от тех практических проблем, с которыми сталкиваются создатели коммуникационных систем. Значимость и сложность этих проблем становятся очевидными на примере внедрения системы *PACS*, предназначенной для хранения и передачи цифровых изображений. Подобные системы уже давно вышли из стадии проектных разработок, однако до сих пор их производство не налажено из-за экономических барьеров и слабого материально-технического обеспечения.

Система *PACS* хранит рентгеновские и другие изображения в цифровой форме, может передавать их по запросам абонентам, обеспечивая при этом высокое качество. Изображения на дисплее по четкости не уступают фотоснимкам. В настоящее время, чтобы просмотреть результаты рентгеновского анализа, врачу приходится то и дело идти в рентгеновское отделение. Пациенты вынуждены носить свои рентгеновские снимки от врача к врачу. Было бы гораздо удобнее и эффективнее, если бы рентгеновские изображения прямо передавались в поликлиники и больницы; это особенно важно, когда один и тот же снимок срочно должен быть показан нескольким специалистам, находящимся в разных местах.

Программное обеспечение, необходимое для получения изображений в цифровой форме и передачи их по каналам связи, уже давно разработано и вполне доступно. Существуют для этих целей и линии связи на оптических волокнах, способные пропускать

информацию с требуемой скоростью 200 Мбит/с. Наконец, имеются и терминалы для демонстрации изображений с достаточно высоким разрешением (они уже используются в телевидении и кинопромышленности). Конечно, в дальнейшем цифровые системы хранения, обработки и передачи изображений будут интенсивно развиваться и в скором будущем станут значительно более совершенными, но даже те, что есть сейчас, могли бы намного облегчить работу врачей. При сегодняшней остро конкурентной финансовой обстановке в здравоохранении трудно оправдать применение дорогостоящих новых технологий.

Что нужно для внедрения в клиническую практику систем хранения и передачи изображений? Что требуется сделать в современной больнице, чтобы пользоваться системой PACS? Прокладка оптической линии связи в действующей клинике сопряжена с большими техническими трудностями и обходится очень дорого. Для разветвленной передачи изображений хорошего качества по различным отделениям клиники необходимо установить большое число автоматизированных рабочих станций, оснащенных мониторами с разрешающей способностью 2048×2048 пикселей (дискретных элементов изображения) с 5—8 уровнями яркости. Учитывая высокую стоимость такой системы целиком, некоторые организации устанавливают оборудование для цифрового анализа изображений по частям: когда аналоговое оборудование устаревает, его заменяют новой, уже цифровой системой. Постепенно приобретаемые цифровые машины и рабочие станции интегрируются в систему PACS. Это лишь один пример того, как можно преодолеть барьеры, сдерживающие внедрение передовой техники.

НИ СЕЙЧАС, ни в ближайшем будущем вычислительные системы для медицины не смогут достичь такого уровня понимания технических, клинических и социальных аспектов лечения человека, каким обладает врач-специалист. Описанные здесь консультационные системы представляют собой, конечно, прогресс в применении компьютеров в медицине. Однако их использование не может быть эффективным без здравого аналитического мышления квалифицированного медицинского работника.

Процесс принятия человеком решения далеко не ясен, тем более в случае медицинских проблем, многогранных по своей природе, и специалисты по информатике пока еще не знают, как

смоделировать его на компьютере.

Несмотря на это, мы оптимистично смотрим на перспективы использования компьютеров в медицине. Компьютеры — это нечто большее, чем устройства для «перемалывания» огромных потоков числовых данных. Они могут хранить колоссальные объемы данных, быстро проводить целенаправленный поиск и передавать медицинскую информацию. Эти возможности компьютеров сейчас широко используются. На горизонте появились системы, способные давать обоснованные консультации по

поводу диагноза и лечения конкретных случаев.

Достижения в области разработки и создания новых материалов и интегральных схем, компьютерных сетей и систем расширяют возможности разработчиков программных средств для информационных медицинских систем. Мы надеемся, что в медицине будет внедряться все больше совершенных вычислительных систем, интеллектуальные способности которых позволят им играть пусть подчиненную, но активную роль в клинической практике.

Наука и общество

Звуковое оружие

ОГЛУШАЮЩИЕ гранаты занимают важное место в вооружении командос. Их эффект состоит в том, что они дезориентируют противника, а это дает немалое преимущество при внезапной атаке. Тем же ценны и звуковые пушки. Как часто бывает, в природе есть прототип такого оружия. Наблюдения за дельфинами и другими китообразными в естественной для них среде обитания показали, что эти животные могут издавать мощные звуковые импульсы, которые оглушают рыбу, делая ее беспомощной жертвой.

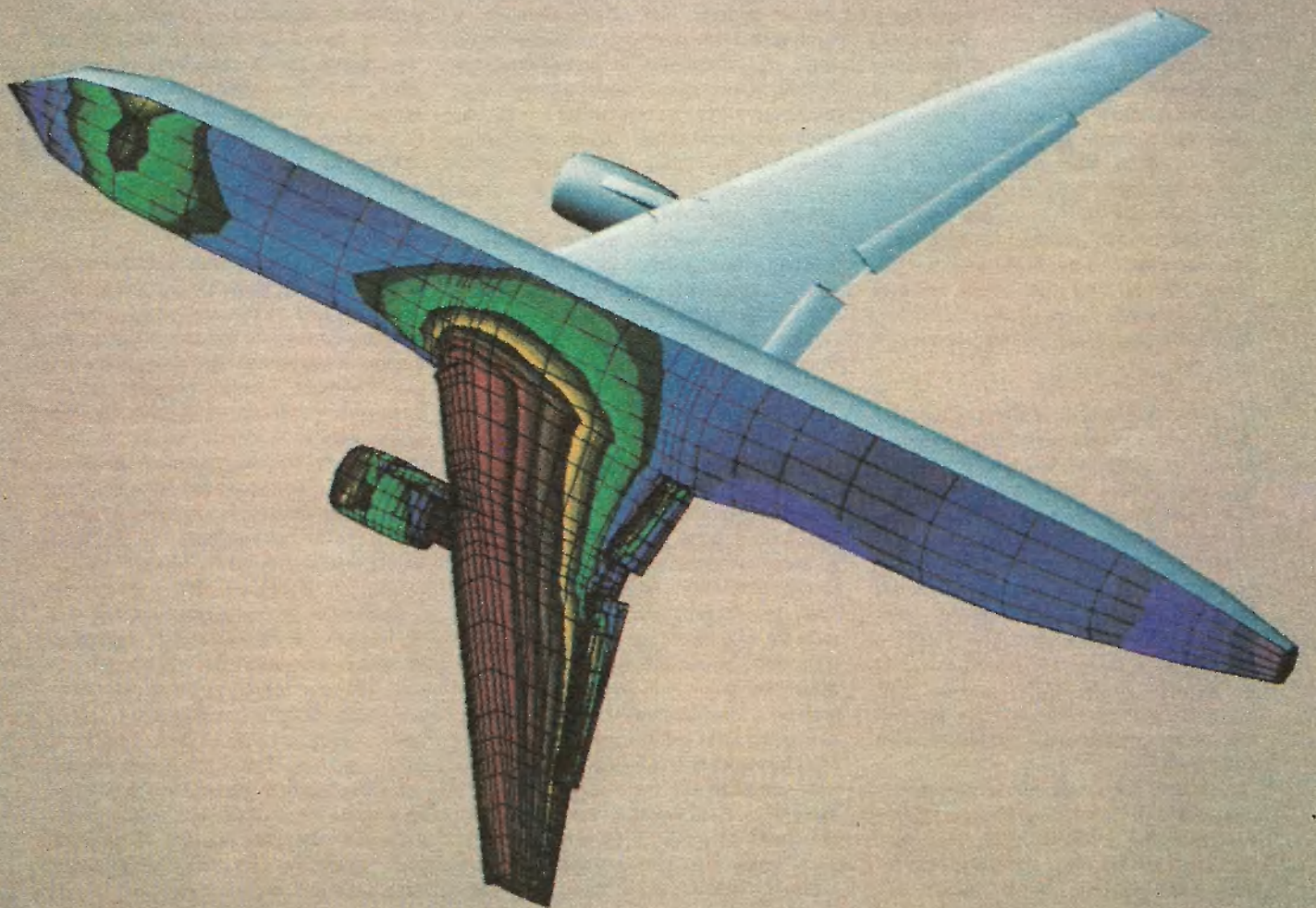
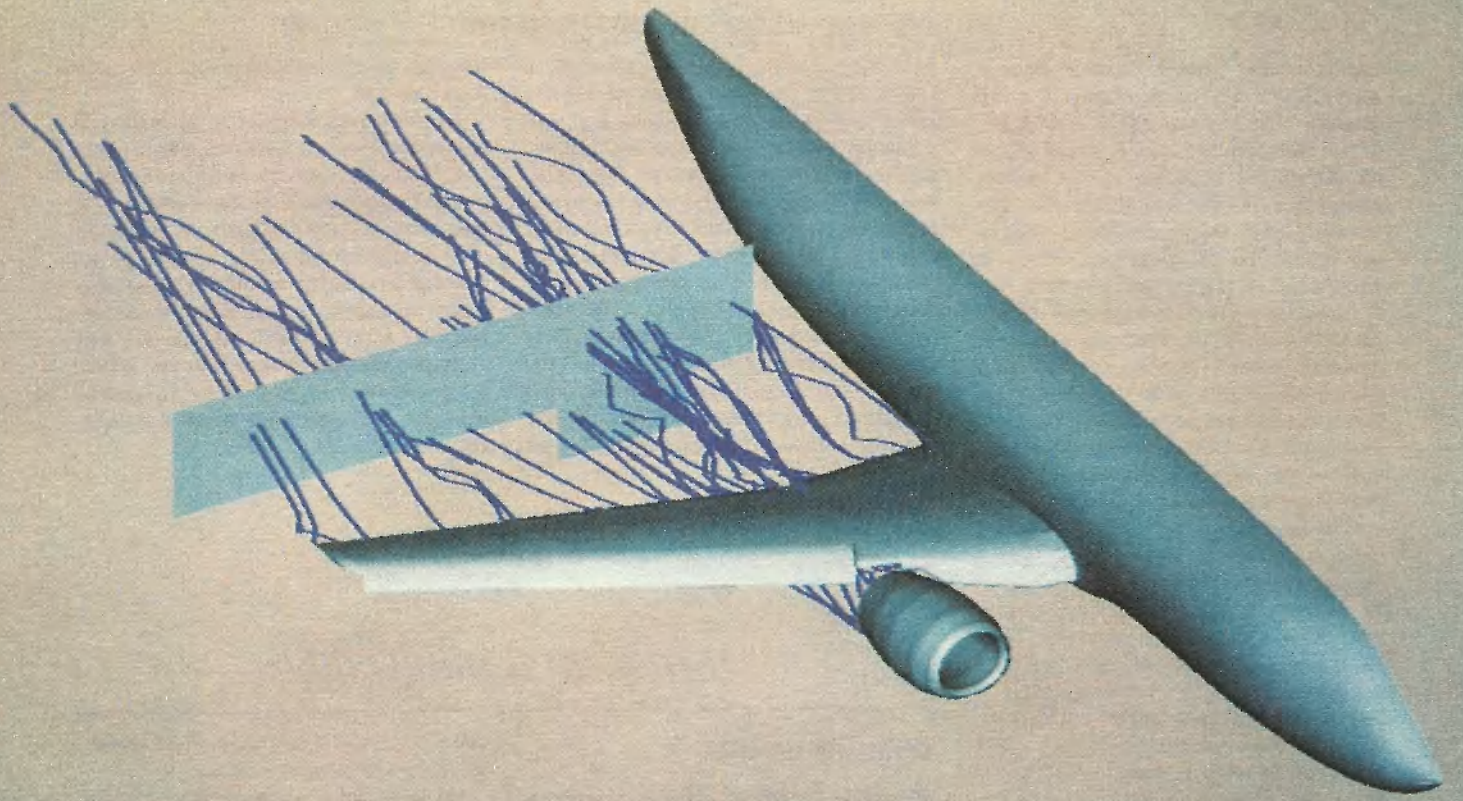
Хорошо известно, что дельфины и другие зубатые киты находят добычу при помощи эхолокации: они выпускают серии быстро следующих друг за другом ультразвуковых щелчков и воспринимают их отражение от объектов, находящихся под водой. По наблюдениям К. Мартена из Лонгской лаборатории биологии моря Калифорнийского университета в Санта-Круссе, по характеристикам эти щелчки сравнимы с ревом реактивного двигателя, если расстояние до лоцируемого объекта велико. Мартен и его коллега К. Норрис задались вопросом, не влияют ли щелчки китообразных на чувствительную боковую линию рыб, которая служит органом ориентации в воде. Эпизодически появлялись сообщения о том, что рыба, перед тем как ее съедает китообразное, находится в оглушенном состоянии, и в желудке зубатых китов нередко находили внешне неповрежденных рыб. Мартену и Норрису не удалось показать, что эхолокационные щелчки, даже очень сильные, как-

либо действуют на рыбу. Но недавно их гипотеза обрела почву.

Несколькими исследователями (прежде всего В. Касс, ранее работавшей в Юго-Западном центре рыболовства в Ла-Холья Национальной службы морского рыболовства США) было обнаружено, что афалина и косатка во время кормежки издают резкие звуки наподобие выстрелов. Эти звуки были записаны, и оказалось, что их частота ниже, чем у эхолокационных щелчков, и находится в диапазоне акустической чувствительности рыб. Уровень «выстрелов» в несколько раз выше, чем щелчков, а продолжительность в 1000 раз больше.

Серии эхолокационных щелчков сопровождаются звуками, похожими на стрельбу или на взрывы оглушающих гранат, иногда на пулеметный огонь. Сходные звуки дельфины издают при угрожающих демонстрациях; по-видимому, это аналогично оскаливанию зубов у собак. Проведя анализ подобных звуков, Мартен пришел к выводу, что они «неголосового» происхождения. У кашалотов также обнаружены звуки типа выстрелов, но не ясно, коррелируют ли они с кормежкой.

Мартен отмечает, что полученные записи звуков, издаваемых китообразными, не доказывают гипотезу об оглушении жертвы. «Выстрелы» у дельфинов и других зубатых китов не всегда совпадают с кормежкой, кроме того, в неволе таких звуков вообще не наблюдалось. Последний факт Мартен объясняет тем, что в замкнутом пространстве подобные звуки, вероятно, невыносимо громки. Он планирует провести исследование влияния «выстрелов» на рыб в неволе.



Вычислительные системы для автоматизации производства

*Суперкомпьютеры могут стать важным элементом
промышленного проектирования. Уже сейчас они оказывают
существенное влияние на конструкцию самолетов и автомобилей,
помогая улучшить их аэродинамические характеристики*

АЛЬБЕРТ М. ЭРИСМАН, КЕННЕТ В. НЕВИС

ПРИМЕНЕНИЕ суперкомпьютеров, обладающих высоким быстродействием, открывает новые перспективы в области автоматизированного проектирования, что в конечном итоге приведет к повышению качества продукции и экономии средств на этапе ее разработки.

Однако существует множество проблем, связанных с применением суперкомпьютеров, которые, в частности мешают их широкому использованию в авиационной промышленности, хотя ряд относящихся к этой промышленности задач являются непосильными даже для них. Кроме того, множество ограничений, накладываемых существующим математическим обеспечением, сильно сокращают число суперкомпьютеров, применяемых в производстве. Наконец, переход от вычислительного анализа на суперкомпьютере к полной интеграции автоматизированного проектирования с автоматизированным производством представляет собой проблему, весьма далекую от окончательного решения. Преодоление всех этих трудностей — вот цель, которая должна быть достигнута. На примере процесса проектирования самолета попытаемся объяснить, почему так необходимо решение перечисленных проблем.

Аэродинамика была одной из первых областей применения компьютеров. Еще лет двадцать назад их стали использовать в самолетостроении для моделирования аэродинамических потоков вокруг профиля крыла (поперечного сечения крыла) и в меньшей степени для моделирования потоков вокруг фюзеляжа самолета. Сегодня суперкомпьютер дает возможность специалистам по аэродинамике моделировать самолет полностью либо выделять составляющие лобового сопротивления, испытываемого его отдельными частями.

По мнению нашего коллеги, Пола Е. Раберта из компании Boeing, вычисление аэродинамических характеристик на суперкомпьютере революционизировало процесс проектирования, а сам суперкомпьютер стал столь же важным элементом авиационного производства, как и аэродинамическая труба. Следует также отметить, что аэродинамические вычисления относятся к числу наиболее сложных расчетов.

Суперкомпьютер позволяет изучить детали спектра обтекания тела воздушным потоком, измерять которые традиционным способом в аэродинамической трубе было невозможно и не под силу обычным компьютерам. Кроме того, совокупность дан-

ных, введенных в суперкомпьютер, может быть преобразована в трехмерное изображение на рабочей станции, исследуемое с разных углов и точек наблюдения. Именно поэтому специалисты компании Boeing обычно применяют вычислительный анализ для проектирования фюзеляжа, крыла самолета, стойки, удерживающей двигатель (называемой пилоном), и кожуха двигателя (гондолы). Испытание в аэродинамической трубе может выявить лишь наличие лобового сопротивления, компьютер же позволяет разбивать лобовое сопротивление на отдельные составляющие и точно измерять их вклад в общую величину. Вычислительный анализ дал возможность проводить аэродинамические исследования с такой степенью детализации, которая недоступна экспериментальному методу.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ играли решающую роль при конструировании самолета модели «Боинг-737—300», выпущенного в 1984 г. За 17 лет до этого был создан его предшественник, очень удачная модель «Боинг-737—200». Для того чтобы уменьшить расход горючего, конструкторы «Боинга-737—300» решили немного удлинить фюзеляж (в остальном конструкция фюзеляжа осталась такой же, как и у «Боинга-737—200») и использовать новые двигатели, имеющие более эффективные параметры. Однако оказалось, что новые двигатели имеют существенно больший диаметр, чем двигатели прежней конструкции.

Очевидно, что для установки двигателей большего диаметра нельзя было использовать такие же пилоны, как у «Боинга-737—200», расположенные под крыльями. Для сохранения прежнего положения двигателей требовалось удлинить шасси для

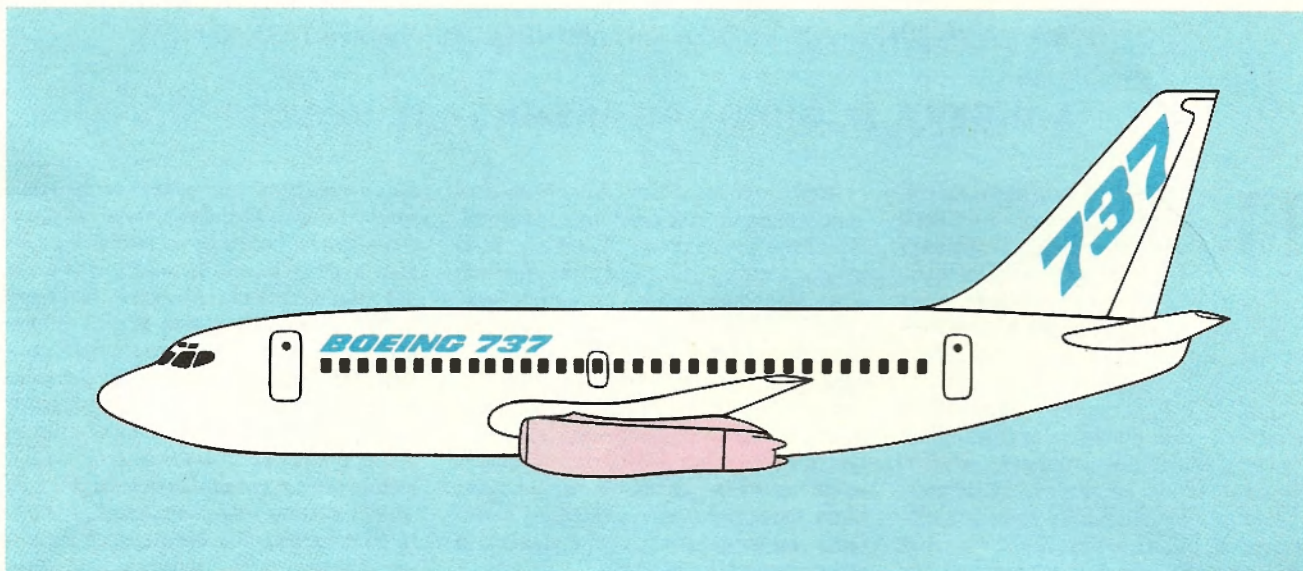
ВОЗДУШНЫЕ ПОТОКИ на поверхности самолета можно моделировать с помощью суперкомпьютера и получать на экране дисплея их трехмерные изображения. На верхнем рисунке изображены смоделированные потоки частиц от двигателя и задней кромки крыла «Боинга-737—300». Траектории определялись путем построения плоскости позади крыла, служившей для определения координат частиц в различных точках воздушного потока. Суперкомпьютер может также моделировать полный воздушный поток и вычислять соответствующие уровни давления в различных точках крыла и фюзеляжа. На нижнем рисунке изображено распределение давления воздуха, возникающего при взлете и посадке «Боинга-767—200» (при выдвинутых посадочных закрылках). Участки с меньшим давлением воздуха (скорость течения воздушного потока выше) выделены красным цветом, а области, испытывающие повышенные нагрузки (низкая скорость воздушного потока), отмечены фиолетовым цветом.

обеспечения необходимого земного просвета, т. е. добавить избыточный вес, что влекло за собой значительные конструктивные изменения и увеличение стоимости самолета. Это решение было неприемлемым. Конструкторы думали расположить двигатели не под крылом, а впереди него, при этом обеспечивался необходимый земной просвет без значительного увеличения веса и стоимости. Однако на пути реализации этого замысла су-

ществовало одно препятствие: многократные испытания в аэродинамической трубе показывали, что всякий раз, когда двигатели устанавливали вблизи передней кромки крыла, лобовое сопротивление достигало недопустимо высокого уровня. По словам Раберта, на протяжении последних двадцати лет специалисты в области аэродинамики многократно пытались разместить двигатель ближе к крылу путем модификации конструк-

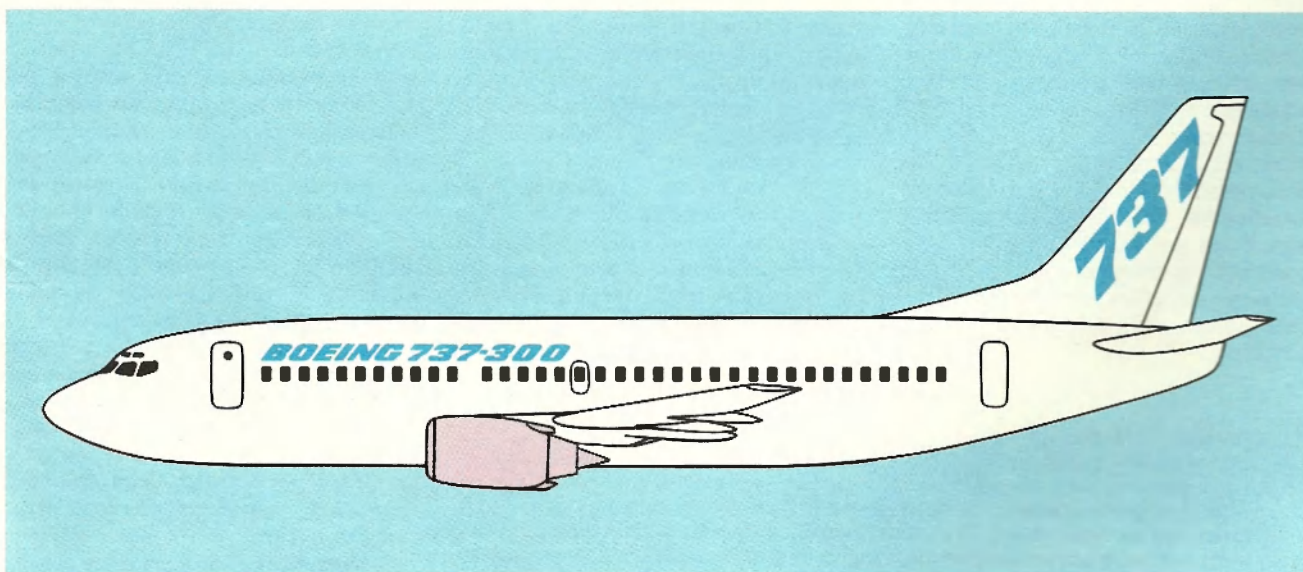
ции гондолы на основе испытаний в аэродинамической трубе, но их попытки были тщетны.

Как и предполагалось, анализ с использованием компьютера показал, что при расположении двигателя близко к крылу создается избыточное лобовое сопротивление. Однако в отличие от испытаний в аэродинамической трубе компьютерный анализ выявил действительный механизм возникновения лобового сопротивления,



ДВИГАТЕЛИ, которыми оснащен «Боинг-737—200», заключены в гондолы небольшого диаметра, расположенные под крыльями. Эти двигатели потребляют больше топли-

ва, чем те, которые заключены в гондолу большего диаметра, поскольку испытывают большее трение в воздушном потоке.



ЗАДАЧА СОЗДАНИЯ БОЛЕЕ ЭКОНОМИЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ привела к изменению конструкции самолета «Боинг-737—200». В результате была создана модель «Боинг-737—300», показанная на рисунке. Здесь двигатель помещен впереди крыла. Это положение считалось недопустимым по результатам испытаний в аэродинамической тру-

бе, которые указывали на чрезмерно высокое лобовое сопротивление. С помощью суперкомпьютера специалисты смогли проанализировать все силы, действующие на модель двигателя, расположенного перед крылом. В результате конструкция гондолы была изменена с тем, чтобы свести к минимуму лобовое сопротивление.

секрет, которого не удавалось раскрыть на протяжении двух десятилетий. С помощью компьютера специалисты смогли оценить несколько различных конструкций, причем с большим уровнем детализации, чем было возможно раньше с использованием аэродинамической трубы. На основе полученной информации они предложили совершенно новое решение по размещению двигателя и изменили конструкцию gondoly. Путем моделирования было установлено, что асимметричная gondola, по форме напоминающая грушу, позволяет почти полностью исключить взаимодействие с воздушным потоком над крылом. За счет использования такой gondoly удалось разместить двигатель близко к крылу и резко снизить лобовое сопротивление.

ДРУГОЙ пример, иллюстрирующий возможности суперкомпьютера, связан с конструированием «Боинга-757», выпущенного в 1982 г. Разработку этой модели планировалось начать через шесть месяцев после создания широкофюзеляжного «Боинга-767». Из практических соображений предполагалось установить на обе модели одинаковые кабины для пилотов. Пилоты самолетов должны проходить специальную подготовку в кабинах тех самолетов, которые они будут пилотировать. Если бы модели 757 и 767 были спроектированы с одинаковыми кабинами, то их пилоты проходили бы подготовку по одинаковой программе, что дало бы авиакомпаниям значительную экономию времени и средств. Однако главная трудность состояла в том, что «Боинг-757» должен был иметь более узкий и более короткий фюзеляж, чем «Боинг-767». Как на «Боинге-757» сохранить конструкцию кабины, спроектированной первоначально для «Боинга-767», учитывая при этом различие в размерах обоих самолетов?

Характер обтекания воздушным потоком линии соединения кабины и фюзеляжа имеет критическое значение; большое лобовое сопротивление в этой области может значительно увеличить расход топлива и шум в салоне. Для решения этой проблемы предполагалось провести детальный аэродинамический анализ модели 757, установив на ней широкую кабину от «Боинга-767».

Обычно такой анализ требует построения нескольких макетов кабины с неодинаковым соединением с фюзеляжем. После испытаний в аэродинамической трубе выбирают оптимальный вариант соединения. Однако время на эту работу было весьма ограни-

ченным, поэтому анализ конструктивных вариантов кабины было решено провести с помощью суперкомпьютера. Оптимальное решение было найдено всего за несколько дней (в противоположность нескольким месяцам, требующимся на исследования в аэродинамической трубе). Конструкторы были настолько уверены в полученных результатах, что рекомендовали начать производство «Боинга-757» еще до проверки этих результатов путем испытаний в аэродинамической трубе.

Новейшая модель самолета — «Боинг-7J7», находящаяся еще в стадии проектирования, откроет новую эпоху в развитии реактивной авиации. Двигатели этого самолета, расположенные рядом с хвостовой частью, приводят в движение систему лопаток с криволинейным профилем, находящихся сзади gondoly. Внешние лопатки более эффективны, чем закрытые лопатки обычного реактивного двигателя. Их использование обеспечивает значительную экономию топлива и скоростные характеристики, сравнимые с характеристиками самолетов существующих типов. Это радикальное конструктивное решение было бы невозможным без применения суперкомпьютера. Другими аспектами проектирования самолетов с помощью суперкомпьютера являются структурный анализ отдельных частей самолета, электромагнитный анализ и проектирование систем управления.

В НАСТОЯЩЕЕ время почти во всех главных автомобильных компаниях проектирование кузовов автомобилей с улучшенными аэродинамическими характеристиками осуществляется с помощью суперкомпьютеров. Например, компания Ford использовала суперкомпьютер на протяжении всего этапа проектирования автомобиля «Таурус» модели 1986 г. Это позволило не только снизить расход топлива автомобилем, но и сэкономить несколько миллионов долларов на проектировании, главным образом за счет того, что отпала необходимость в изготовлении многочисленных опытных образцов. Автомобильные компании широко используют суперкомпьютер и для имитации аварийных ситуаций. Моделирование столкновений на экране позволяет сберечь огромные денежные суммы, которые иначе расходовались бы на изготовление дорогостоящих опытных образцов, обреченных на разрушение.

Нефтехимическое производство является, вероятно, наиболее ярким примером эффективного использова-

ния суперкомпьютеров в промышленности. С конца 70-х годов они широко применяются компаниями, занимающимися поиском и добычей нефти. Данные сейсмического контроля можно ввести в компьютер и использовать для обнаружения геологических особенностей, связанных с наличием нефтеносных пластов. Это дает возможность определять места бурения скважин с гораздо большей точностью, чем при использовании обычных методов. Поскольку стоимость бурения скважин весьма высока (до 15 млн. долл. при бурении одной скважины на суше и значительно больше в море), затраты на проведение вычислений оказываются относительно небольшими по сравнению с получаемой прибылью. Кроме того, суперкомпьютеры играют не последнюю роль и при добыче нефти. Путем моделирования динамики жидкостей в процессе экстракции они помогают повысить отдачу нефти.

Суперкомпьютеры весьма эффективны в решении тех проблем, где применение сложных методов математического моделирования позволяет улучшить конструкцию изделия или повысить производительность труда. Они могут использоваться как для моделирования молекулярных структур и схем размещения радиолокаторов, так и для создания фильмов (многие кадры в фильме «The Last Star Fighter», например, были полностью генерированы на суперкомпьютере). Широкое применение суперкомпьютеры нашли в программах подготовки пилотов и в летных тренажерах. Недавно они стали использоваться крупными финансовыми компаниями для анализа размещения ценных бумаг.

В строительстве суперкомпьютеры служат для моделирования напряжений и деформаций, возникающих при землетрясениях в таких сооружениях, как мосты, герметизирующие оболочки ядерных реакторов, большие арены для зрителей и небоскребы. Расширяется их применение и в системе прогнозирования погоды: подробные данные о климатических и географических условиях вместе с текущими показаниями приборов, регистрирующих ураган, могут быть введены в компьютер для получения трехмерной картины его распространения. С помощью суперкомпьютеров метеорологи теперь могут гораздо точнее предсказывать путь продвижения урагана.

Мы рассмотрели некоторые достижения, связанные с применением суперкомпьютеров в промышленности и в других областях. Однако эти достижения даются не всегда легко, к

тому же они еще недостаточно широко распространены. Чтобы понять причины этого, обратимся к проблемам, с которыми сталкиваются создатели и пользователи суперкомпьютеров.

ТЕРМИН «суперкомпьютер» используется как для обозначения компьютеров, имеющих максимальную на сегодняшний день мощность (определяемую такими понятиями, как наибольшее быстродействие и наибольший объем памяти), так и для обозначения компьютеров, отличающихся внутренней архитектурой. В данной статье под этим термином подразумеваются компьютеры, относящиеся к первой категории, т. е. те, которые имеют максимальную мощность. Эти компьютеры обычно также характеризуются современной архитектурой. Компьютеры из второй категории менее мощные, однако они имеют новейшую архитектуру. Мы будем называть их квазисуперкомпьютерами.

Так как суперкомпьютеры были созданы специально для решения сложных вычислительных задач, то быстродействие считается их важнейшей характеристикой. Опытный образец первого суперкомпьютера был изготовлен компанией Control Data в нача-

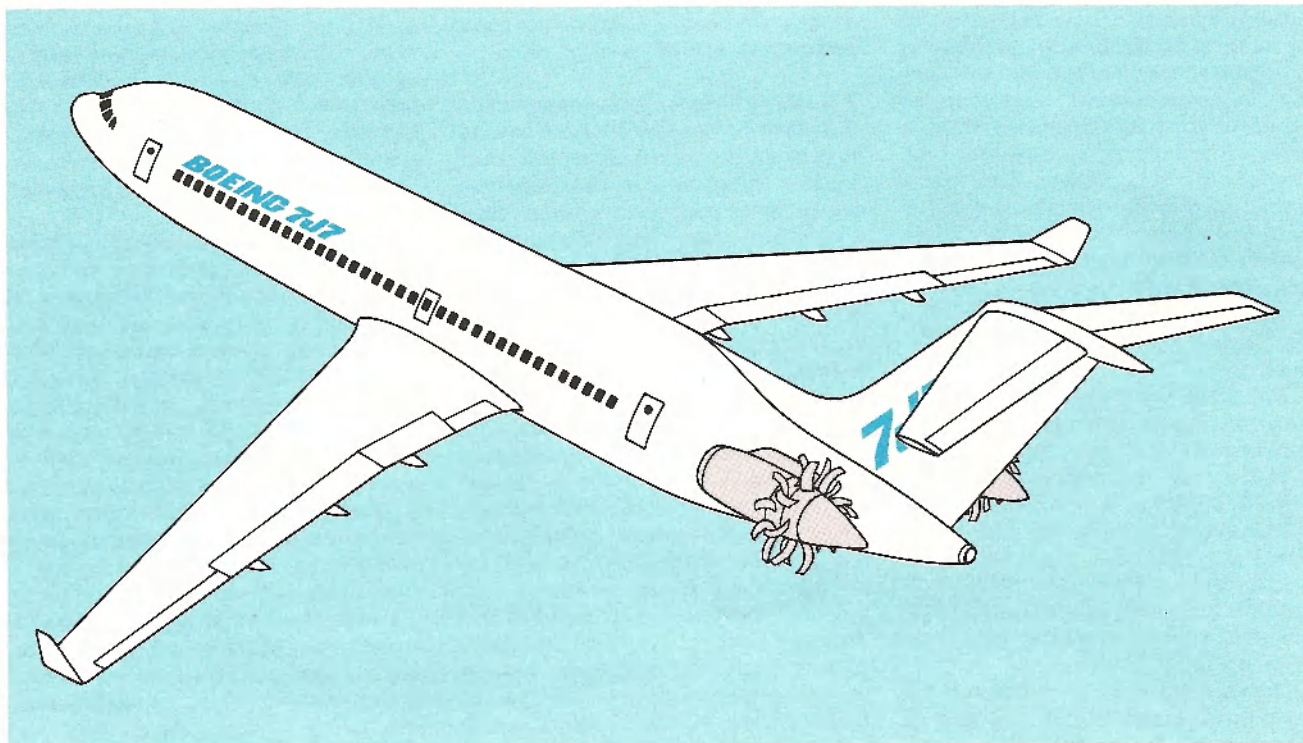
ле 70-х годов. Эта модель — CDC 7600 — выполняла 5 млн. операций с плавающей точкой в секунду, т. е. имела быстродействие 5 Мфлоп. Сегодня суперкомпьютер работает в 200 раз быстрее и его быстродействие составляет примерно 1 млрд. операций с плавающей точкой в секунду, или 1 Гфлоп. Квазисуперкомпьютеры работают медленнее, но также имеют высокое быстродействие — от 20 до 100 Мфлоп.

Задача, решение которой может потребовать один год при использовании обычного универсального компьютера, решается менее чем за час на суперкомпьютере. Такой прогресс стал возможен за счет использования уникальной векторной и параллельной архитектуры аппаратного обеспечения компьютера. Концепция векторной и параллельной архитектуры относительно нова в области информатики. Она основывается на двух принципах: магистральном расположении арифметических модулей и параллелизме (копировании вычислительных блоков). (Подробнее см. статью Дж. Фокса и П. Мессины «Архитектура компьютеров» на с. 16). Оба этих принципа позволяют значительно увеличить быстродействие, но это достижимо только в том случае, если их особенности учтены в математиче-

ском обеспечении.

Недостаток векторной архитектуры, действующей подобно ленточному транспортеру или сборочной линии, состоит в том, что средняя скорость, с которой выполняются операции, зависит от времени, необходимого для выполнения первой вычислительной операции на входе системы, и от количества вычислений, которые могут выполняться на магистрали. Это является весьма важным обстоятельством. Машинные программы, которые минимизируют общее число вычислений, необходимых для решения задачи, но не имеют длинного потока вычислений (называемого длинным вектором), иногда не дают желаемых результатов.

Теоретически параллельные процессоры, в которых ряд соединенных друг с другом компьютеров решает задачу одновременно, имеют неограниченные возможности для увеличения быстродействия: имея n компьютеров можно решить задачу в n раз быстрее, чем на одном компьютере. Однако параллельное аппаратное обеспечение не приводит к сколь угодно большому увеличению быстродействия; известно, например, что работу, которую один человек может сделать за 10 лет, не смогут выполнить 1 млн. людей за 1 мин.



СХЕМАТИЧЕСКИЙ ЧЕРТЕЖ нового самолета «Боинг-7J7», открывающего новую эпоху в реактивной авиации. Двигатели, расположенные в хвостовой части, приводят в движение систему лопаток, которые являются более эффективными, чем лопатки обычного реактивного двигателя.

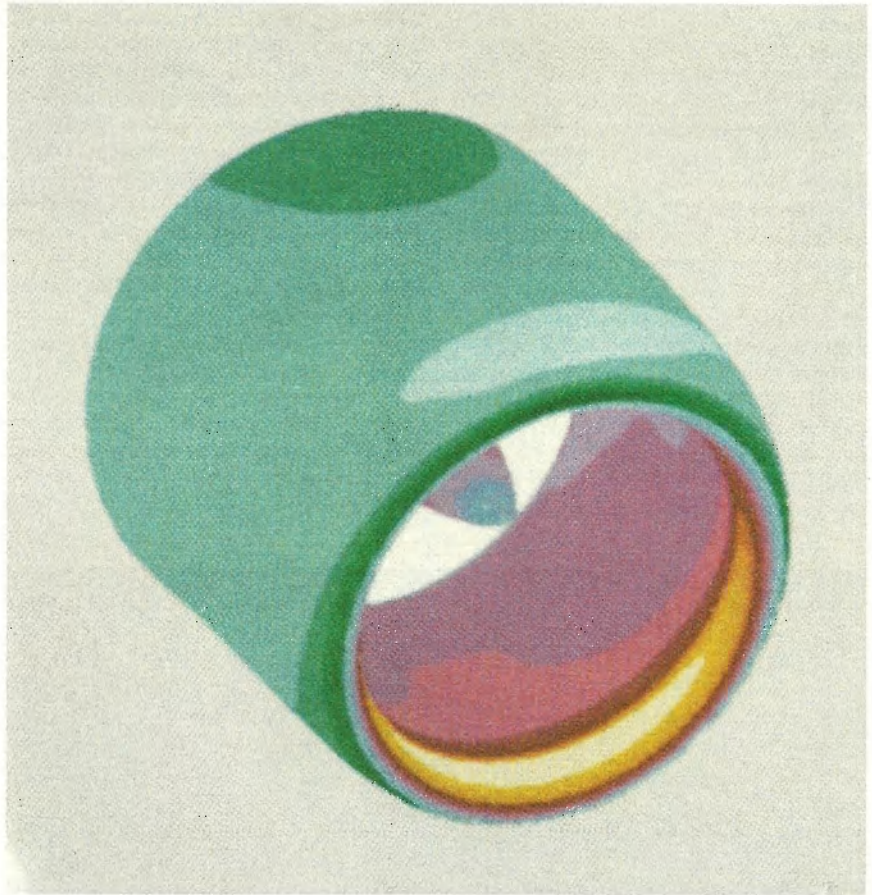
За счет такого расположения удалось достичь значительной экономии топлива. Создание этой конструкции было бы невозможно без вычислительного анализа, проведенного на суперкомпьютере.

Сочетание векторной и параллельной архитектур должно привести к значительному увеличению мощности компьютеров. Оценивать работу суперкомпьютера только по числу операций в секунду — все равно, что оценивать качество различных спортивных автомобилей исходя лишь из их максимальной скорости, без учета таких параметров, как время разгона, устойчивость на виражах или удобство управления.

Эффективность работы компьютера зависит от ряда параметров: объема памяти, способности обрабатывать небольшие массивы чисел (известные как векторы небольших размеров), скорости обработки дискретных данных (скалярной производительности машины) и возможностей математического обеспечения, с которым совместим компьютер. Компьютеры, хорошо работающие на «верхнем уровне» (те, которые очень быстро обрабатывают большие массивы данных), не всегда способны хорошо работать на «нижнем уровне», когда требуется обрабатывать дискретные «порции» данных небольшого объема. К сожалению, большинство реальных задач должны решаться на том и другом уровнях.

Таким образом, быстродействие не является единственной характеристикой компьютера. Его эффективность зависит еще от двух факторов: объема памяти и скорости передачи данных из памяти в вычислительные устройства.

ПАМЯТЬ — это один из главных факторов, определяющих эффективность компьютера. Скорость вычислений часто зависит от размера его блоков памяти. Наибольшие затраты времени обычно связаны с передачей данных из вспомогательного запоминающего устройства в оперативную память и обратно. Несмотря на то что рост объема памяти суперкомпьютеров сравним с ростом их мощности, в некоторых случаях этого недостаточно. Компьютер CDC 7600, выпущенный в начале 70-х годов, имел память емкостью 500 тыс. 15-разрядных чисел. Емкость памяти компьютера Cray-2, созданного пятнадцатью годами позже, была в 512 раз больше: в ней можно было хранить 256 млн. 15-разрядных чисел. Поскольку сложность вычислений резко возрастает, то памяти емкостью в несколько миллиардов слов может быть недостаточно для обеспечения будущих вычислений. Кроме того, чтобы использовать такую память, могут потребоваться значительные изменения в математическом обеспечении.



ГОНДОЛА ДВИГАТЕЛЯ моделируется на суперкомпьютере в трехмерном пространстве. Цветом отмечены различные скорости воздушного потока внутри и вне гондолы при полете самолета. Наибольшая скорость потока внутри гондолы у ее переднего края (*желтый*), в том месте, где воздух протекает по обшивке и попадает внутрь двигателя. Наименьшая скорость у потока, протекающего по направлению к задней части гондолы (*фиолетовый*) и промежуточная скорость у потока снаружи гондолы (*зеленый*).

Важной проблемой является согласование возможностей суперкомпьютера с требованиями конкретного пользователя. Например, максимальное быстродействие суперкомпьютера вряд ли имеет большое значение для измерений аэродинамических нагрузок на крыло; в этом случае для пользователя более важна скорость построения математической модели крыла и определения возникающих в нем напряжений. Поэтому скорость выполнения компьютером сложной задачи со множеством переменных может быть более важной характеристикой, чем то, насколько быстро он способен обрабатывать тщательно построенные массивы чисел. Это во многом похоже на оценку достоинств спортивного автомобиля, когда он движется не по прямой ровной дороге с максимальной скоростью, а по извилистой горной дороге.

В каждом конкретном случае число вычислений, проводимых компьюте-

ром, может колебаться. Обычный компьютер позволяет вести вычисления числовых значений в 50 узлах сетки (для 20 различных моментов времени), суперкомпьютеры способны обрабатывать данные в 50 тыс. узлах сетки для 200 различных моментов времени. К счастью, одновременно с суперкомпьютерами была создана рабочая станция, преобразующая данные в графические изображения. Без такой станции было бы невозможно освоить огромное количество данных. Кроме того, графические изображения, сформированные для разных моментов времени, могут быть выведены вместе и показаны в виде фильма, т. е. движущейся картины, дающей визуальное представление о моделируемом физическом процессе. Например, поток воздушных частиц над крылом самолета может быть представлен на экране в виде непрерывной струи, что дает возможность специалистам «увидеть» силы, дейст-

вующие на крыло. Важно и то, что, варьируя переменные, можно изменить конструкцию исследуемого объекта, изображенного на экране рабочей станции, и тем самым точно определять составляющие турбулентности.

Эффективность суперкомпьютеров, как и вообще всех компьютеров, зависит от программного обеспечения, что особенно ощутимо в промышленности. Программное обеспечение можно модифицировать или перестраивать для проведения научных исследований на суперкомпьютере, однако очень сложно модифицировать программу объемом в 100 тыс. строк, предназначенную для управления производственным процессом и

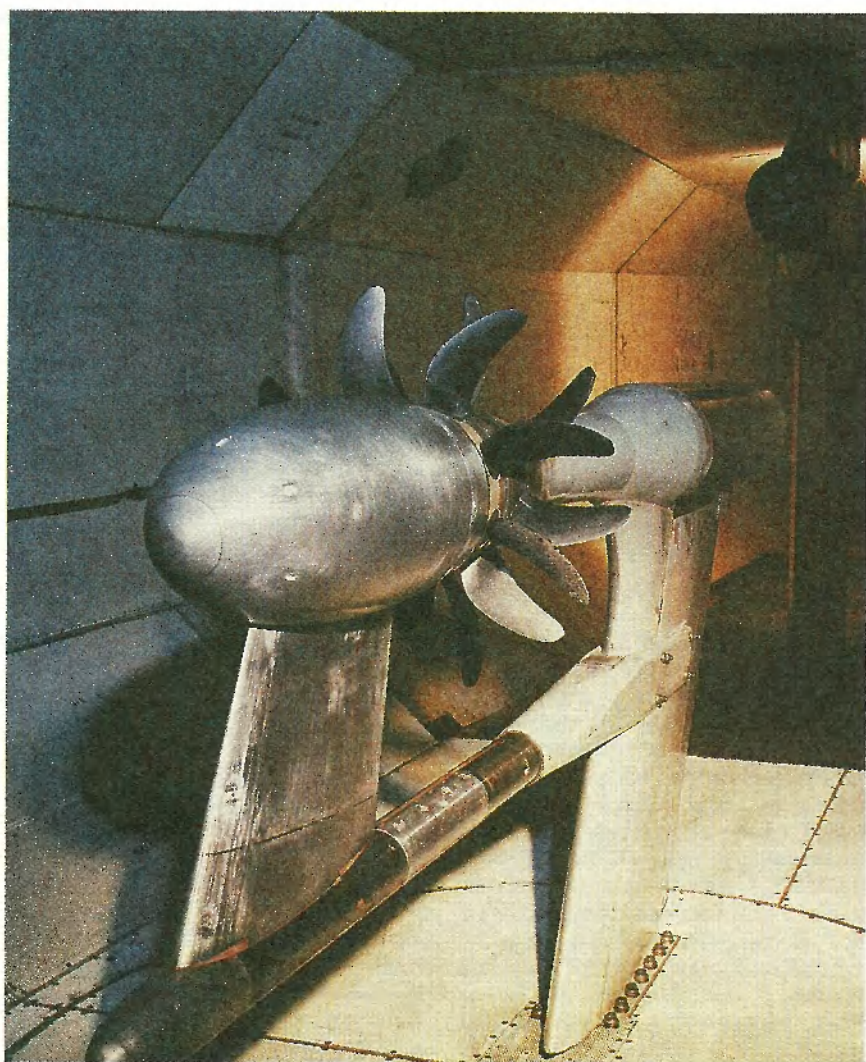
являющуюся важным компонентом цикла промышленного проектирования. Для промышленного предприятия средних размеров время, необходимое для создания новой программы, проверки ее на надежность и точность, может оказаться недопустимо большим. Поэтому желательно иметь программное обеспечение, которое подходило бы для компьютеров с различной архитектурой. Однако на практике это не всегда осуществимо. Следовательно, подобно тому как шли на слом старые фабрики, чтобы освободить место автоматизированным производствам, надо решительно отказываться от устаревшего программного обеспечения и создавать простор для нового поколения

программ, соответствующего новому поколению компьютеров.

ВСЕ ПОПЫТКИ создать средства «переключения» программного обеспечения с традиционных компьютеров на новые высокопроизводительные машины имели ограниченный успех. Одним из таких средств является «интеллектуальный компилятор», который осуществляет автоматическую векторизацию программ, т. е. преобразует инструкции языка высокого уровня в инструкции для векторных компьютеров. Так как компиляторы могут только перестраивать готовые программы, а не находить новые алгоритмы или подходы к решению задач, более приемлемые для суперкомпьютеров, то их применение оказывается весьма ограниченным.

Едиственное решение проблемы, связанной с программным обеспечением, по мнению многих специалистов, состоит в написании программ на новом языке, специально предназначенном для векторных или параллельных машин. Большинство традиционных языков программирования, таких, как Фортран, которые были главной опорой научных вычислений в течение последних 20 лет, должны быть заменены на язык, соответствующий современной суперкомпьютерной технологии. Но время, которое требуется на разработку нового языка, на его реализацию в аппаратных средствах и, наконец, время, необходимое пользователям для переписывания, испытания и внедрения нового программного обеспечения стоимостью в миллиарды долларов, вместе составляют недопустимо большие и вряд ли реальные сроки. Даже частичные изменения в языке программирования могут потребовать много времени. Например, новый языковой стандарт, Фортран-8Х, начали разрабатывать более 10 лет назад, однако весьма сомнительно, что он будет принят и получит широкое распространение раньше 1990 г. Но даже и этот стандарт не позволяет в полной мере использовать компьютеры новейшей архитектуры с максимальной эффективностью. Таким образом, разработка новых языков программирования будет очень медленным решением весьма небольшой доли всей совокупности проблем.

Другой подход заключается в использовании программного обеспечения, состоящего из программ, построенных из отдельных вычислительных модулей. Так называемые вычислительные модули представляют собой предварительно запрограммированные алгоритмы, которые



МОДЕЛИРОВАНИЕ процесса обтекания различных частей самолета в высокоскоростной аэродинамической трубе, хотя и является дополнением к вычислительным моделям, создаваемым на компьютере, все еще играет важную роль на заключительных стадиях проектирования. На рисунке изображен заключенный в гондолу двигатель самолета с лопатками, вращающимися в противоположных направлениях. Двигатель установлен на пилоне и проверяется при скорости воздушного потока до 1000 км/ч. Для измерения скорости потока над гондолой расположены микрофоны, регистрирующие уровень шума, создаваемого лопатками.

принимаются определенной группой пользователей в качестве стандартной программы. Модули имеют три преимущества: наличие интерфейса на стандартном языке (что позволяет использовать их на любом компьютере), возможность их тщательной настройки на конкретную архитектуру аппаратного обеспечения, специализацию для выполнения наиболее распространенных вычислений (например, матричные операции, преобразование Фурье и сортировка), т. е. операций, типичных при решении большинства сложных аналитических задач. Так как значительная часть машинного времени часто расходуется именно на эти вычисления, то применение вычислительных модулей (которые имеют относительно невысокую стоимость) может дать огромную экономию времени и средств. Две библиотеки модульных программ фирмы Boeing — библиотека математической статистики BCSLIB и библиотека программ обработки векторов — используются сотни миллионов раз в год в составе программного обеспечения суперкомпьютера Cray X-MP и других новейших промышленных компьютеров.

Еще одним преимуществом модулей является то, что они позволяют оценить возможности применяемого метода моделирования еще до создания прикладной программы, необходимой для его реализации. Предварительное сравнение различных методов решения одной и той же задачи приводит в конечном итоге к экономии времени и средств.

НЕСМОТЯ на впечатляющий рост производительности и числа суперкомпьютеров, существует еще одно препятствие на пути их широкого применения, а именно сложность интеграции трех компонентов: пользователя, графической рабочей станции и суперкомпьютера. Связь пользователя с компьютерами обычно осуществляется по телефонным линиям, имеющим пропускную способность 1200 бод (бит/с). Применение таких линий для связи с суперкомпьютерами, оперирующими огромными массивами данных, напоминало бы попытку осушить океан через соломинку; большие массивы данных просто невозможно быстро передавать по проводам на значительные расстояния.

Проблема связи с суперкомпьютерами является весьма существенной. Оператор может ввести данные, которые обрабатываются на суперкомпьютере в течение 5 мин (вместо 12 часов на обычном компьютере), но получению результатов будет пре-

пятствовать двенадцатичасовая задержка. Протяженные линии связи в настоящее время имеют пропускную способность 56 кбит/с, но и она является слишком малой для многих задач, решаемых на суперкомпьютерах. Создание последовательности движущихся изображений (например, для описания потока частиц у крыла самолета) требует еще больше времени: вместо анализа одного набора переменных суперкомпьютер должен проводить целые серии вычислений и выводить ряд графических иллюстраций, каждая из которых вносит свой вклад в общий поток данных, передаваемых по сети. По этим причинам некоторые абоненты отказались от использования телефонных линий и пришли к выводу, что гораздо быстрее можно передавать и получать данные с помощью воздушной почты. Несмотря на свое несовершенство, такой способ становится все более распространенным.

ДРУГОЙ подход к решению проблемы связи был предложен в центре сетевого обслуживания суперкомпьютеров (Хантсвилл, шт. Алабама). В январе 1988 г. там начнет действовать новая коммуникационная система. Предполагается, что суперкомпьютер будет передавать информацию между двумя территориями Алабамского университета со скоростью 1,5 млн. бит/с. Создание такой системы в масштабах страны обойдется слишком дорого, но так как вычислительная сеть в Алабаме состоит из небольшого числа узлов, то ожидается, что она будет работать достаточно хорошо.

В Исследовательском центре НАСА в Моффет-Филде (шт. Калифорния), где находится самый мощный в мире суперкомпьютер, предложено еще одно решение проблемы протяженных коммуникаций. Оно заключается в размещении мощных рабочих станций в непосредственной близости от главного суперкомпьютера, что, естественно, полностью исключает потребность в протяженных линиях связи. Таким же способом решили проблему протяженных коммуникаций в компании Boeing Computer Services в Бельвю, шт. Вашингтон. Лаборатория вычислительной аэродинамики соединена там через ряд рабочих станций с расположенным недалеко суперкомпьютером Cray X-MP. Это позволило уменьшить примерно до 100 м расстояние, на которое должны передаваться данные.

Второй шаг на пути к интеграции ориентирован на рабочую станцию как средство повышения производи-

тельности, а не на суперкомпьютер. Он состоит в организации «дружественной» пользователю структуры, в которой ученый или инженер работает за персональным компьютером или на рабочей станции, используя стандартное программное обеспечение для решения прикладных задач. Вся связь с суперкомпьютером осуществляется непосредственно через рабочую станцию, которая использует математическое обеспечение, имеющее интерфейс с прикладным языком пользователя. Данные вводятся непосредственно в суперкомпьютер, где они преобразуются в векторизованные программы, при этом оператору не обязательно знать язык программирования высокого уровня. О том, что анализ проводился на суперкомпьютере, можно судить только по сложности результатов.

Широкому применению математического обеспечения, «дружественного» пользователю, препятствует низкая пропускная способность коммуникационных сетей и ограниченная мощность персонального компьютера. Учитывая эти трудности, компания Boeing предложила для нефтедобывающих фирм специальный вид услуг: возможность пользоваться банком данных и вычислительной техникой для составления геологических карт и анализа нефтеносных пластов.

Несмотря на перечисленные успехи интеграции, возможности суперкомпьютера могут быть реализованы в промышленности полностью только на основе интеграции вычислительного анализа, в котором суперкомпьютер себя прекрасно зарекомендовал, с процессом производства, где он еще мало используется. Именно по этим причинам интеграция процессов проектирования и подготовки производства представляется чрезвычайно важным делом.

Информация, которая является наиболее важной для производства, например допустимые отклонения от проекта, оценка производственных затрат, долговечность продукции, редко учитывается при автоматизированном проектировании. Приняв во внимание такую информацию, можно прийти к компромиссу, в котором будут учтены как интересы заказчика, так и производителя.

Интеграция еще не получила должного распространения по ряду причин. Суперкомпьютеры появились в промышленности относительно недавно, около 10 лет назад, поэтому они еще не успели оказать влияние на многие виды продукции, сходящей в настоящее время со сборочных линий. Процесс проектирования требу-

ет, чтобы связь систем автоматизации проектирования и систем автоматизации производства оставалась стабильной в течение всего (зачастую длительного) периода разработки изделия. Таким образом, на протяжении многих лет необходимо строго следить за конфигурацией аппаратных средств, программного обеспечения и данных. Быстрые изменения в архитектуре компьютеров и соответствующие изменения в программном обеспечении несовместимы с этими требованиями стабильности. Создание такой продукции, как самолет, представляет собой длительный путь от исходной идеи до опытного образца. Все элементы его конструкции взаимосвязаны и конструктивное изменение одного из них почти неизбежно приводит к изменению других. Поэтому на разных стадиях процесса проектирования происходит «замораживание» дальнейших изменений, в результате чего весь комплекс автоматизации проектирования и производства становится «камнем преткновения».

Ситуация может изменяться по мере того, как более сложные модели, еще находящиеся в стадии проектирования, «продвигаются» к стадии производства, однако здесь следует учитывать то, что, несмотря на огромную эффективность интеграции систем автоматизации проектирования и систем автоматизации производства, они не всегда совместимы друг с другом. Например, аэродинамическое моделирование может показать, что для достижения максимальной эффективности крыло самолета должно иметь такую-то форму, однако изготовление такого крыла может быть связано с большими производственными трудностями. Возможно, что металл просто нельзя согнуть, так как того «хотел» бы суперкомпьютер, или крыло получится очень тяжелым либо слишком хрупким.

Наконец, некоторые вычислительные модели для детального аэродинамического анализа не под силу даже современным суперкомпьютерам. Выполнение очень сложных расчетов с неопределенными и приближительными параметрами, необходимых для полной интеграции систем проектирования и производства, все еще находится за пределами возможностей существующих компьютеров.

В конечном счете суперкомпьютеры могут работать в комплексе с системами искусственного интеллекта, в которых преобразуются преимущественно символьные, а не числовые данные и часто используются специализированные компьютеры.

Теоретически искусственный интеллект может использоваться в будущем для более глубокой обработки больших, сложных наборов данных, обрабатываемых в настоящее время на суперкомпьютере.

МОЖНО с уверенностью сказать, что сегодня технология суперкомпьютеров развивается одновременно в нескольких направлениях: в сторону повышения мощности, аналитических возможностей, конкурентоспособности, а также развития архитектуры и искусственного интел-

лекта. Суперкомпьютеры уже сейчас революционизировали самолетостроение, и в этой отрасли постоянно ведется поиск путей использования все более быстродействующих и более мощных компьютеров. Следующие пять лет будут особенно решающими не только из-за множества возможных достижений в области технологии, но и потому, что в эпоху жесткой конкуренции на внешнем рынке развитие промышленности в США может зависеть от того, насколько широко в ней применяются суперкомпьютеры.

Наука и общество

Грязное дело

МАЛО КТО связывает современную биотехнологию со столь прозаическими проблемами, как переработка материалов и очистные мероприятия. Однако именно в этих областях производства есть шансы получить большую выгоду от способности определенных бактерий и грибов «переваривать» твердые породы и металлы. Если одни микроорганизмы, более широко известные, с успехом используются для производства антибиотиков и прочих фармакологических средств, то другие могут послужить для переработки угля, извлечения металлов из бедных руд и обезвреживания токсичных веществ в окружающей среде.

Микробам для существования не нужно большого притока энергии извне — они сами генерируют энергию в процессе метаболизма, так что их использование не требует значительных затрат и не наносит особого вреда природе. Биологическая «переработка материалов» с успехом происходила естественным путем. Осваивая экологические ниши в толще земли и воде, различные микроорганизмы за миллионы лет эволюции приобрели способность включать в свой метаболизм металлы и другие неорганические компоненты минералов. Некоторые микроорганизмы живут за счет воды, воздуха и того или иного неорганического вещества. Другие могут разрушать минералы косвенным путем — в результате реакций, вызываемых побочными продуктами своего метаболизма. Как сказал Олсон из

Национального бюро стандартов США, «эти крохотные существа — микробы — живут на Земле повсюду, от горных вершин до морского дна... и они перерабатывают вещества на протяжении вот уже 3,5 млрд. лет». Проблема состоит в том, чтобы обнаружить их, определить, каков процесс превращения исходного материала, и найти способы ускорить этот процесс.

Институт по проблемам электроэнергетики совместно с Бэттелевским институтом и Хартфордским университетом уже нашли несколько видов грибов, способных перерабатывать определенные типы угля. Они обратили внимание на то, что обыкновенный грибок *Polyporus versicolor* (он обуславливает гниение древесины), когда субстратом ему служит лигнит (слабоуглифицированный бурый уголь), выделяет фермент, превращающий лигнит в водорастворимую жидкость, которая имеет почти такую же теплотворную способность, как и твердый лигнит. Фирма Houston Lighting and Power Company провела аналогичным планом исследования с целью найти бактерию, способную превращать лигнит прямо в метан — основной компонент природного газа.

Несмотря на эти усилия, «биологическую переработку угля следует считать долгосрочным планом использования микробов», — заявила Линда Этертон из Института по проблемам электроэнергетики. Что касается ближайшего будущего, то наиболее реально, вероятно, использование мик-

роорганизмов для удаления из угля серы, азота и металлов. Этертон указывает, что для каждой примеси, содержащейся в угле, «существуют микробы, способные ее утилизировать». Очистка угля перед сжиганием уменьшает количество сажи и загрязнение атмосферы*.

С помощью микроорганизмов можно извлекать также медь и уран из таких руд, которые невыгодно перерабатывать обычными способами. Эта технология предельно проста: нужно лишь поливать руду водой, а остальное совершат бактерии, содержащиеся в породе. Они получают энергию, окисляя серу и железо; в результате медь или уран переходят в водорастворимую форму и вымываются из породы. Так можно извлекать и другие металлы — цинк, свинец, галлий и даже золото и серебро**.

Микроорганизмы можно использовать для обработки отходов с целью изъять из них металлы стратегического значения (кобальт, хром, никель), а также медь. Национальное бюро стандартов США ведет исследования в этом направлении в рамках научной программы, осуществляемой совместно с Американским институтом железа и стали и Управлением по военно-морским исследованиям.

Не всегда необходимо искать уже существующие в природе микроорганизмы с нужными биохимическими способностями: на удивление легко создавать путем селекции новые штаммы бактерий, включающих в свой метаболизм даже токсичные металлы. Одни бактерии накапливают металлы внутри клетки, другие переводят их в вещества, выпадающие в осадок или, наоборот, улетающие в атмосферу. Эти процессы можно плодотворно использовать для очистки воды и почвы от ядовитых соединений.

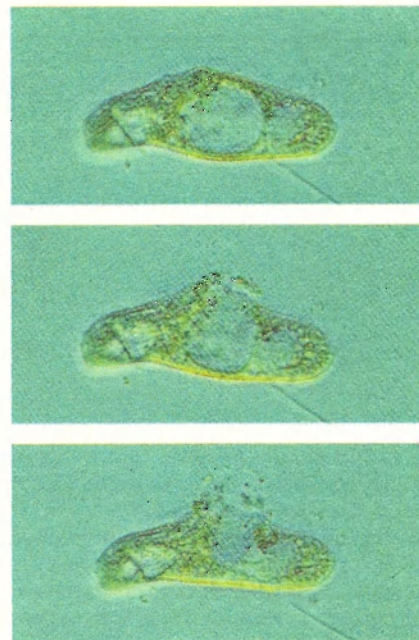
Лягушачья кожа

НЕУЖЕЛИ колдуны и знахари, использовавшие для своих зелий лягушек, уже знали то, что только недавно открыли ученые? М. Заслофф, руководитель отдела генетики чело-

века в Национальном институте здоровья и развития детей, обнаружил в коже африканской шпорцевой лягушки *Xenopus* новый класс бактерицидных веществ. Эти вещества, представляющие собой пептиды, — Заслофф назвал их магенинами (от еврейского слова, значащего «защита») — обеспечивают организму систему химической защиты, по-видимому, совершенно отличную от иммунной системы. Результаты Заслоффа опубликованы в журнале «Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.»

Xenopus — обычное, широко используемое в биологических исследованиях лабораторное животное. Заслофф на протяжении многих лет для нужд своей работы извлекал у самок лягушек яйца. Раны после этой хирургической процедуры заживали и животных возвращали в камеру с водой, в которой они жили и в которой, разумеется, было полно микробов. Однажды — случилось это в 1986 г. — Заслофф обратил внимание на то, что раны у лягушек почти всегда заживали чисто, без таких признаков активности иммунной системы, как воспаление или нагноение, хотя они все время находились в присутствии бактерий. Исследователь сразу заподозрил, что дело в какой-то неизвестной защитной системе; ведь у насекомых, например, есть средства химической защиты от инфекции.

Идентифицировать защитные вещества лягушки оказалось непросто. В слизи, выделяемой кожей лягушки, бактерицидной активности не было выявлено совсем, а в грубых экстрактах кожи она была очень мала. Но, когда к экстракту кожи добавили вещества, которые подавляют действие содержащихся в кожных клетках ферментов, расщепляющих белки, удалось обнаружить два бактерицидных агента. Это оказались пептиды, состоящие из 23 аминокислотных остатков каждый. Они очень похожи друг на друга, различаясь лишь двумя аминокислотами, но действуют на разные микроорганизмы. Заслофф, по его словам, не верил своим глазам, наблюдая, как в присутствии пептидов терпят поражение грибки и даже устойчивые простейшие, в том числе некоторые формы малярийного паразита. Для окончательного доказательства роли обнаруженных пептидов он синтезировал их искусственно и продемонстрировал бактерицидный эффект. Впоследствии Заслофф идентифицировал у *Xenopus* еще два соединения с такими свойствами. Он думает, что вещества, подобные магенинам, будут найдены и у других животных, а также у человека.



ОДНОКЛЕТОЧНЫЙ ОРГАНИЗМ *Paramecium* набухает и лопается в присутствии магенина II — бактерицидного вещества, содержащегося в коже шпорцевой лягушки.

Моделирование при помощи компьютера, проведенное Р. Фелдманом из Национальных институтов здоровья, показало, что молекулы магенинов могут образовывать спирали как раз такой длины, чтобы пронзить насквозь клеточную мембрану. Как считает Заслофф, группы этих молекул могли бы формировать поры в мембране микроорганизма. Через поры из клетки наружу и в обратном направлении перемещались бы ионы, что катастрофически нарушало бы осмотическое и электрохимическое равновесие и губило клетку. Когда обычный одноклеточный организм инфузория *Paramecium* оказывается в присутствии магенина II, его сократительная вакуоль, которая в норме опорожняет отходы жизнедеятельности клетки в окружающую среду, перестает функционировать и клетка лопается. Почему магенины не причиняют вреда клеткам самой лягушки — это для Заслоффа «вопрос номер один».

Нужны годы исследований, чтобы узнать, возможно ли какое-либо практическое применение новых бактерицидных агентов, но даже то, что уже установлено, обнадеживает. Так, магенины не повреждают клетки крови и не очень токсичны для мышей. Сейчас изучается их действие на инфекцию вирусом, вызывающим СПИД, и на раковые клетки.

* В ФРГ, например, использует ся установка для удаления серы из каменного угля с помощью бактерий *Thiobacillus ferrooxidans*, окисляющих содержащийся в угле пирит. — Прим. ред.

** См. статью: К. Брирли. Микробы-горняки, «В мире науки», 1983, № 6. — Прим. ред.

Новая головоломка: «Магические квадраты Рубика»

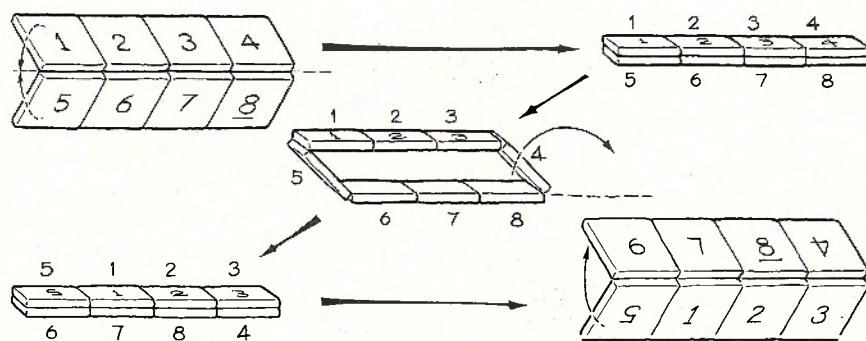


ДЖИРЛ УОЛКЕР

ЭРНЁ РУБИК, изобретатель ставшего популярным «кубика Рубика», недавно выпустил новую, не менее занимательную головоломку под названием «Магические квадраты Рубика». Она состоит из восьми пластмассовых квадратов: два ряда по четыре квадрата, лежащих в одной плоскости. Квадраты соединены леской, которая проходит

в пазах, параллельных диагоналям квадратов, и могут поворачиваться вокруг своих сторон.

На одной стороне головоломки выполнены изображения трех отдельных колец. На обратной — такие же три кольца, но в «разобранном» виде. Задача заключается в том, чтобы, сгибая и разгибая головоломку, получить изображение замкнутых колец



Операция R изменяет симметричное расположение квадратов

$Z_1 =$	$Z_2 =$	$Z_3 =$
$Z_4 =$	$Z_5 =$	$Z_6 =$
$Z_7 =$	$Z_8 =$	$Z_9 =$
$Z_{10} =$	$Z_{11} =$	$Z_{12} =$
$Z_{13} =$	$Z_{14} =$	$Z_{15} =$

Симметричные состояния, отличные от Z_0

на обратной стороне. В случае успеха кольца окажутся сцепленными. Головоломка при этом приобретает форму большого квадрата с «вышербленным» углом.

Решать эту задачу, конечно, можно путем беспорядочного манипулирования квадратами в той степени, в какой это позволяет сделать соединяющая их леска. Однако при внимательном изучении головоломки удастся найти более рациональные пути решения поставленной задачи и обнаружить при этом некоторые скрытые в головоломке «хитрые» математические закономерности. Недавно в журнале «Spektrum der Wissenschaft» (издание журнала «Scientific American» на немецком языке, выпускаемое в ФРГ) В. Глебе опубликовал результаты своих исследований «магических квадратов». Я повторю здесь ход его рассуждений, а затем приведу решение головоломки, найденное одним из читателей немецкого издания. Возможно, что это кратчайшее решение в том смысле, что оно требует наименьшего числа операций над головоломкой.

Поверните головоломку так, чтобы разбросанные фрагменты колец были сверху, длинные ряды квадратов располагались горизонтально, а фирменный знак находился в верхнем ряду. Пронумеруйте квадраты по рядам, начиная с верхнего левого квадрата. Такой порядок расположения квадратов и присвоенных им номеров назовем нулевым и обозначим Z_0 . В этом положении квадраты размещены в определенном порядке относительно друг друга, а их номера имеют определенную ориентацию.

Сколько других возможных состояний (конфигураций) может иметь головоломка при размещении квадратов в два ряда по четыре? Расположение квадратов можно изменить; при этом изменяется и ориентация нанесенных на них цифр. Состояния, которые возникают при повороте головоломки как целого, в расчет принимать не будем. Исключим также из рассмотрения состояния, которые представляют собой зеркальные отражения основных. Но и при этих условиях число различных вариантов расположения квадратов должно составлять около 1,3 млрд.

Глебе показал, что эта оценка завышена: различных состояний может быть только 32. Объясняется это тем, что квадраты определенным образом соединены леской, и поэтому не все перестановки квадратов можно реализовать. Всякий квадрат всегда примыкает к одним и тем же соседним квадратам, хотя их относительные ориентации могут меняться. Напри-

мер, квадрат под номером 1 всегда примыкает к квадратам 2 и 5, а квадрат 2 всегда соседствует с квадратами 1 и 3.

Всякое расположение квадратов можно считать либо симметричным, либо несимметричным. При симметричных расположениях (их всего 16) квадраты с номерами от 1 до 4 выстраиваются в горизонтальный ряд или группируются в большой квадрат на левой или на правой стороне двухрядной головоломки. Любое другое расположение квадратов называется несимметричным.

Начнем с состояния Z_0 . С помощью каких манипуляций можно перейти к другим состояниям? Одно из них достигается с помощью манипуляции, которую Глебе называет операцией R . Согните головоломку по центральной горизонтальной линии от себя, т. е. так, чтобы сгиб был обращен к вам, и прижмите нижний ряд квадратов снизу к верхнему ряду. Теперь «прокрутите» конструкцию подобно гусенице, сдвинув верхний ряд вправо, а нижний влево на один квадрат. Далее разъедините горизонтальные ряды, поворачивая нижний ряд вокруг дальнего края верхнего ряда. Заметим, что головоломка раскладывается только в одном направлении.

Операцию R можно выполнить при любом состоянии головоломки. Однако удастся прокрутить головоломку или нет, зависит от того, как она была сложена вначале. В некоторых случаях, для того чтобы сложенную головоломку нужно складывать не от себя, а на себя. Направление, в котором вы в конце раскладываете головоломку, также зависит от ее начального состояния. Направление прокручивания может быть иным, т. е. верхний слой смещается влево, а нижний — вправо.

Выполнение операции R приводит к тому, что симметричное состояние Z_0 переходит в несимметричное, при котором номера 6, 7, 8 и 4 (цифра 4 перевернута) на квадратах окажутся в верхнем ряду, а 5 (перевернута), 1, 2 и 3 — в нижнем. Отметим, что соседние квадраты в результате все равно будут рядом. Из этого состояния выполните операцию R еще раз. Головоломка вновь вернется в состояние Z_0 . Изменение взаимного расположения квадратов в результате операции, подобной R , называется перестановкой. Когда операция, выполненная дважды, возвращает головоломку в прежнее состояние, ее называют обратимой. В символической форме можно записать так: $RR = i$, где i означает операцию, не меняющую состояние.

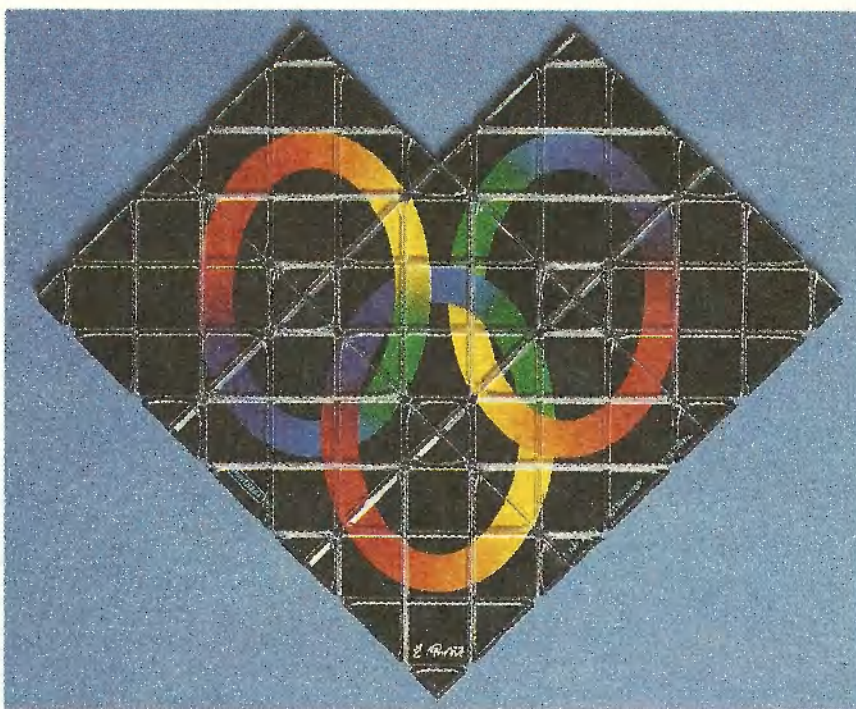
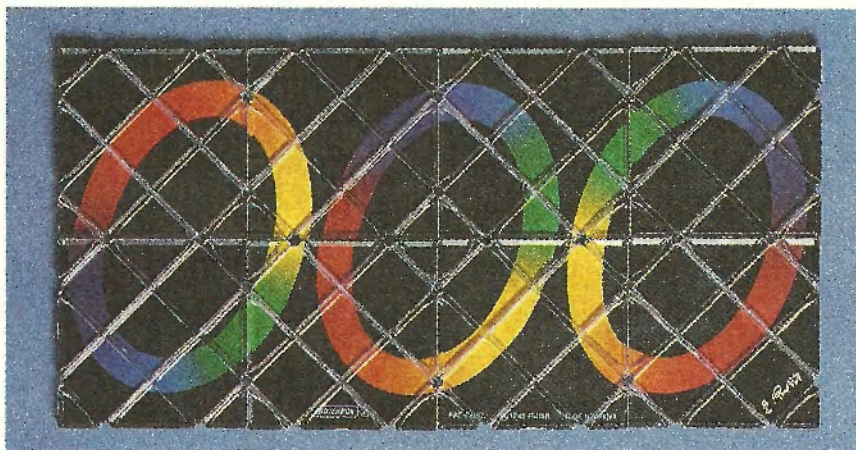
Следующая задача сводится к поиску путей преобразования головоломки из нулевого состояния Z_0 в другие

15 симметричных состояний. Один из способов Глебе называет операцией D . Ее выполнение также начинается со складывания головоломки по горизонтальной линии либо от себя, если вначале головоломка находится в состоянии Z_0 , либо на себя. Выполнение второго шага зависит от выбранного направления сгиба. Если головоломку не удастся привести в такое состояние, при котором можно сделать второй шаг, то вернитесь к первоначальному расположению квадратов и согните головоломку в противоположном направлении.

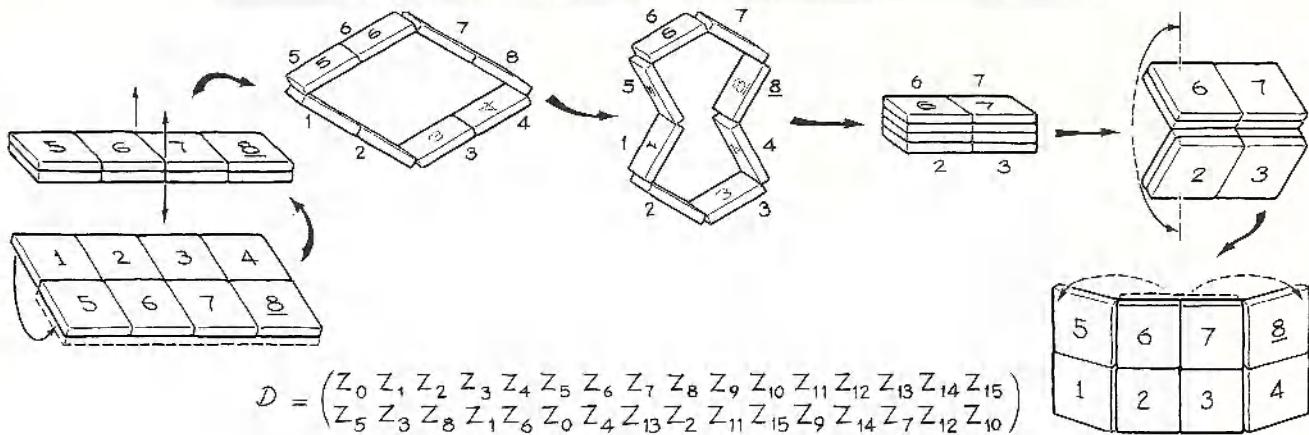
На втором шаге вы делаете из головоломки замкнутую петлю, затем прогибаете внутрь ее левую и правую стороны и складываете так, чтобы верхние и нижние квадраты сомкнулись с находящимися теперь уже

внутри боковыми квадратами. Полученную стопку квадратов разворачиваете — это следующий шаг. В зависимости от того в каком состоянии в этот момент находится головоломка, вам, возможно, потребуется перевернуть стопку «вверх ногами». Ошибиться невозможно. Если стопка не раскрывается, переверните ее и попробуйте еще раз. Наконец, полностью раскройте головоломку, отгнув ее боковые «створки».

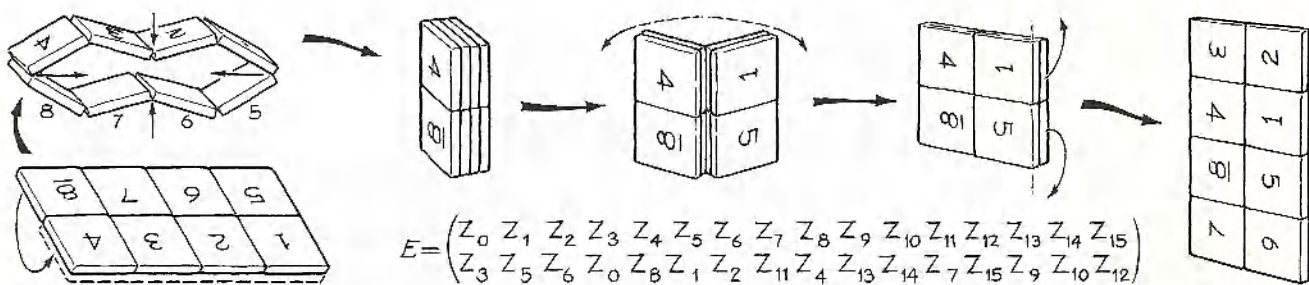
В результате выполнения операции D головоломка из состояния Z_0 переходит в другое симметричное состояние, называемое Z_5 , в котором горизонтальные ряды квадратов меняются местами без изменения ориентации их номеров. Эта операция тоже обратимая. Если вы проделаете операцию D с головоломкой, находящейся в со-



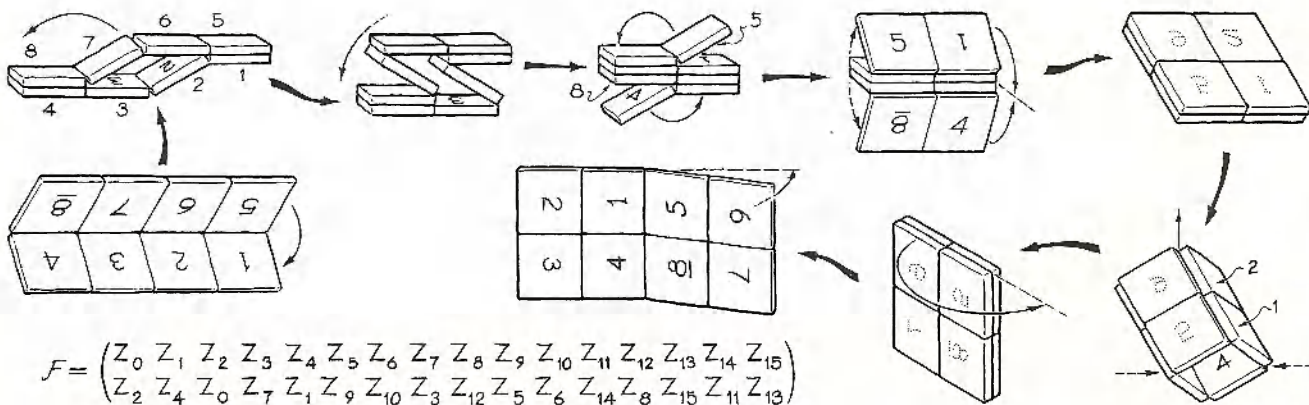
Исходное (вверху) и конечное расположение квадратов головоломки «Магические квадраты Рубика»



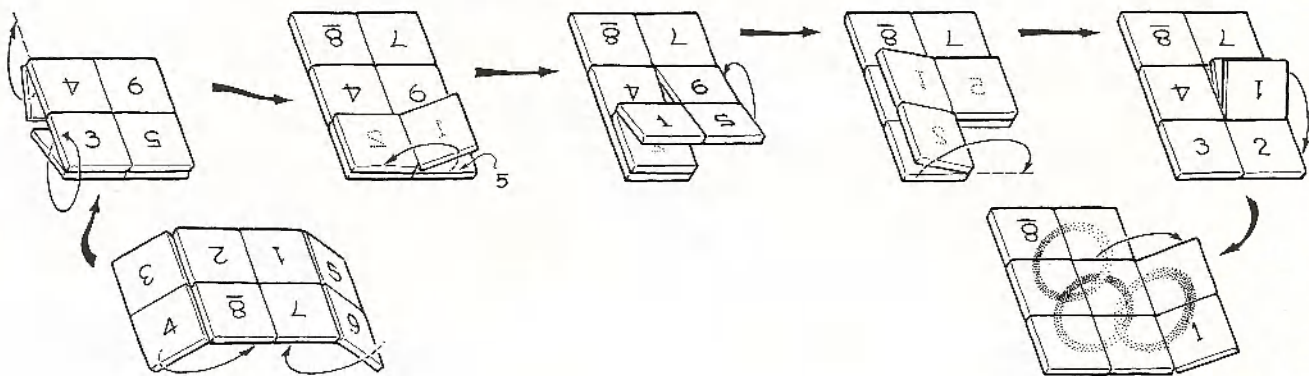
Операция D меняет местами ряды квадратов



Операция E



Операция F меняет одни симметричные состояния на другие



Решение головоломки «Магические квадраты Рубика»

стоянии Z_5 , чтобы вернуть ее в состояние Z_0 , то обнаружите, что сгибание и разгибание обычно выполняются в направлениях, противоположных тем, какие вы делали на пути от Z_0 к Z_5 . Таблица на верхнем рисунке на с. 108 показывает, какие другие симметричные состояния (и из каких состояний) достигаются с помощью операции D . Например, состояние Z_1 превращается в состояние Z_3 и наоборот. В символической форме эту процедуру можно записать так: $D(Z_1) = Z_3$.

Операция E подобна операции D . Опять согните и сложите головоломку, затем сделайте петлю. На этот раз внутрь прогните уже не боковые стороны, а верхние и нижние и сложите головоломку в вертикальную стопку, прижимая боковые квадраты к тем, что находятся внутри. Теперь нужно разложить стопку по ее вертикальной оси на две половинки — по четыре сложенных квадрата в каждой. Для некоторых исходных состояний головоломки эта процедура выполняется легко. При других начальных состояниях для выполнения этого шага головоломку нужно повернуть вокруг вертикальной оси. Ошибиться вам не грозит, поскольку головоломка не может оказаться в таком положении, при котором ее нельзя было бы правильно раскрыть.

Далее, у полученной стопки откидываем расположенные сзади квадраты — два вверх и два вниз. В результате получаем еще одно симметричное состояние — Z_3 . Таким образом, $E(Z_0)$ равно Z_3 . Если попытаться превратить состояние Z_3 снова в Z_0 , применив операцию E , то расположенные квадраты получатся противоположным тому, которое изображено на втором рисунке сверху на с. 108. Преобразования других симметричных состояний, получающихся в результате применения операции E , приведены в таблице, помещенной в нижней части рисунка.

Операция F принципиально отличается от операции D и E . Это видно из третьего рисунка на с. 108. Начиная с состояния Z_0 , согните головоломку на себя. Когда вы попытаетесь сделать петлю, то крайние левые и крайние правые квадраты не будут разъединяться. Правую часть полученной конструкции наложите на левую, сдвигая правую влево. Образуется стопка. Отогните правый верхний квадрат в стопке и наложите его на левый верхний квадрат, а левый нижний квадрат подложите под правый нижний квадрат. Поверните стопку так, чтобы можно было отогнуть на себя верхний и нижний слои. Если ничего не выходит, поверните стопку и сделайте еще одну попытку. Два верхних и два нижних квадрата можно

отогнуть только в одну сторону.

Просуньте пальцы между двумя слоями полученной конструкции и раздвиньте слои. Возможно, что для этого потребуется некоторое усилие, пока проходящая в пазах квадратов леска не протянется на нужную длину. Когда слои разъединятся и головоломка примет форму полого прямого параллелепипеда, нажмите на его левую и правую стороны так, чтобы образовалась вертикальная двухслойная конструкция. Теперь раскройте ее, отгибая или ближний, или дальний край. Если леска с трудом скользит в пазах, вы должны будете приложить небольшое усилие.

Операция F превращает состояние Z_0 в другое симметричное состояние — Z_2 . Это преобразование обратимое. Для того чтобы преобразовать состояние Z_2 обратно в Z_0 , придется сгибать и разгибать головоломку в тех же направлениях, что и прежде.

Таким же образом с помощью описанных операций можно получить состояния Z_2 , Z_3 и Z_5 , каждое из которых превращается в несимметричное после применения операции R . Остальные симметричные состояния можно получить из положения Z_0 , применив последовательно две или более операций. Исследуйте, например, комбинацию DE . (Такое обозначение указывает, что операция E выполняется первой.) В результате вы получите состояние Z_1 . Поскольку комбинация ED приводит к тому же состоянию головоломки, то говорят, что операции E и D коммутативны, т. е. последовательность их выполнения может быть любой.

Операция F более «мощная», чем D и E , потому что она некоммутативна. Например, $DF(Z_0)$ приводит к состоянию Z_8 , в то время как $FD(Z_0)$ — к Z_9 . В приведенной справа вверху таблице указано, с помощью каких операций и их комбинаций можно получить все 15 симметричных состояний, начиная с состояния Z_0 . Каждое получающееся в результате состояние может быть превращено в соответствующее несимметричное состояние путем применения операции R .

Предположим, что к головоломке, находящейся в любом симметричном состоянии, кроме Z_0 , применена серия операций. Получим ли мы заведомо новое состояние? Нет, и это можно видеть на одном из примеров Глебе. Рассмотрим комбинацию $DDEF(Z_{14})$. Выполнив вначале операцию F , получим состояние Z_{11} . Это видно из таблицы на рисунке, демонстрирующем последовательность действий при выполнении операции F : $DDEF(Z_{14}) = DFE(Z_{11})$. Продолжим эту процедуру: $DFE(Z_{11}) = DF(Z_7) = D(Z_3) = Z_1$; Z_1 — уже известное состояние. По-

$i(Z_0) = Z_0$
$DE(Z_0) = Z_1$
$F(Z_0) = Z_2$
$E(Z_0) = Z_3$
$DEF(Z_0) = Z_4$
$D(Z_0) = Z_5$
$EF(Z_0) = Z_6$
$FE(Z_0) = Z_7$
$DF(Z_0) = Z_8$
$FD(Z_0) = Z_9$
$FEF(Z_0) = Z_{10}$
$DFD(Z_0) = Z_{11}$
$FDF(Z_0) = Z_{12}$
$DFE(Z_0) = Z_{13}$
$FDZD(Z_0) = Z_{14}$
$DFEF(Z_0) = Z_{15}$

Таблица перестановок

скольку никаких новых состояний в результате применения любой комбинации операций D , E и F получить нельзя, перестановки, приведенные в таблице, называют замкнутыми.

Как указывает Глебе, в некоторых случаях серию операций можно упростить. Примером может служить перестановка DE . Начнем с состояния Z_0 . Сложим два ряда квадратов в направлении от себя. Раздвинем верхний и нижний ряды в середине и сделаем петлю. Будем тянуть в этом направлении дальше, пока квадраты слева и справа не соприкоснутся, образовав новую двухслойную конструкцию. Раскрыв ее, вы получите состояние Z_1 .

Все эти упражнения можно рассматривать как разминку перед решением основной задачи, заключающейся в том, чтобы найти способ преобразования одного из 32 прямоугольников с расположением квадратиков 2×4 в большой квадрат 3×3 с одним отсутствующим в углу квадратиком. Глебе обнаружил два таких способа, один из которых состоит из 20 операций. Один из читателей опубликованной им статьи нашел более простой способ, который частично иллюстрируется нижним рисунком на с. 108. Вначале выполняется операция R над состоянием Z_0 , а далее, как показано на рисунке. Три переплетающихся кольца появятся тогда, когда будет сделан последний шаг и вы откинете вправо два квадрата, лежащие сверху в правом ряду.

Описания других приемов решения головоломки приведены в книге Дж. Нэрса (см. библиографию к статье на с. 124).

«После ГВУ»: компьютерная игра, в которой моделируется стратегия боя с применением ядерного оружия



А. К. ДЬЮДНИ

ПРЕДСТАВЬТЕ, что вы — глава государства, располагающего ядерным оружием. Только что генерал, начальник штаба вооруженных сил, принес вам сводку данных в виде странной таблицы цифр. Две строки таблицы обозначены словом «мы», а два ее столбца — словом «они». Генерал обращается к вам со словами:

— В этой матрице содержится количественная оценка нашего военного, экономического и политического положения. Как видите, каждой возможной комбинации действий соответствует маленький квадратик в таблице. Если, например, мы атакуем, а противник не отвечает контрударом, то наше положение ухудшится предположительно на 63 условные единицы.

Генерал несколько задумался, но затем, просветлев, добавляет:

— Однако положение противника ухудшится на 74 единицы.

Как глава государства вы уже привыкли выступать с речами и перерезать ленточки. Вам, конечно, пришлось бывать и на совещаниях по стратегическим вопросам, после которых вы признавались, что понять все, о чем там говорилось, вам было сложно. Тем временем начальник штаба продолжает:

— Короче говоря, мы имеем простую матрицу размером 2×2 , пока-

зывающую, насколько велики выигрыш и проигрыш в тех случаях, когда либо одна сторона, либо обе стороны принимают решение нанести ядерный удар по противнику, либо ни одна из сторон такого решения не принимает.

Примерно в такой ситуации вы оказываетесь, когда начинаете стратегическую компьютерную игру, получившую название «После ГВУ» (сокращение ГВУ означает гарантированное взаимное уничтожение; в оригинале игра называется «After MAD». Игра слов: MAD — mutually assured destruction, mad — «сумасшедший», «безумный»). Игра изобретена в 1985 г. в Массачусетском технологическом институте Тэдом Хомер-Диксоном и Кевином Оливо. Слово «после» относится к той стадии игры, когда уничтожение может оказаться и не совсем взаимным. По мере того как оружие становится все более совершенным, появляется возможность нанесения такого удара по противнику, после которого он уже не в состоянии ответить серьезным контрударом. Как следствие у каждой стороны появляется и растет соблазн совершить неспровоцированное нападение. На этой стадии участники игры попадают в ситуацию, известную как «дилемма арестованного».

Как уже говорилось, ключевым элементом игры является матрица 2×2 . Наличие двух строк и двух столбцов объясняется тем, что каждая сторона может совершить два альтернативных действия: либо атаковать, либо воздержаться от нападения. Содержимое матрицы меняется от одной стадии игры к следующей таким образом, что в каждый данный момент матрица подводит стратегический баланс, отражая его в своих числовых элементах. Каждый элемент матрицы состоит из пары чисел, по одной паре на каждую возможную комбинацию действий, избранных обеими сторонами. Первое число каждой пары соответствует оценке

исхода данной комбинации для «нас», а второе — для «них». Если, например, «мы» решили воздержаться и не атаковать в то время, как противник нанес удар, то первое число будет меньше второго.

В последующем содержимое матрицы, конечно, будет зависеть от комбинации «ходов», сделанных обеими сторонами на основании предшествующего содержимого матрицы. Каждая матрица игры приводит к одной из четырех других матриц в зависимости от ходов, сделанных играющими. В игре «После ГВУ» всего насчитывается 110 матриц, или 110 возможных ситуаций. По мере развития событий в игре можно выделить пять различных стадий.

На первой, или начальной, стадии ГВУ стратегическое оружие каждой стороны эффективно только против незащищенных целей, таких, как населенные и административно-хозяйственные центры. На второй стадии (спустя 10 лет после начальной) появляются межконтинентальные баллистические ракеты (МБР) с несколькими независимо наводящимися боеголовками. Хотя значительная часть стратегического оружия старого образца по-прежнему нацелена на незащищенные объекты, каждая сторона придерживается так называемой «противоударной» стратегии: ее боеголовки нацелены исключительно на шахты, в которых спрятаны МБР противника. На третьей стадии (через 20 лет после начальной стадии ГВУ) боеголовки уже значительно усовершенствованы. Взаимное уничтожение теперь не является неизбежным исходом ядерного конфликта, поскольку имеется гарантия, что сторона, нанесшая предупреждающий удар, уничтожит 75% стратегических наступательных сил противника. На четвертой стадии (по прошествии 30 лет после начальной стадии) обе стороны уже располагают новым оружием — МБР с маневренными боеголовками, которые практически способны уничтожить все МБР противника. Взаимное уничтожение уже маловероятно, поскольку теперь стало возможным нанести предупреждающий удар по шахтам с МБР; угроза ответного удара по населению уже не является достаточным сдерживающим фактором перед соблазном нанести предупреждающий удар по стратегическим силам противника. И наконец, пятая стадия (спустя 45 лет после начальной) характеризуется наличием систем противоракетной обороны космического базирования (СПРОКБ), способных полностью заблокировать любое ракетно-ядерное нападение, в котором участ-

		ОН	
		МОЛЧАТЬ	СОЗНАТЬСЯ
ОНА	МОЛЧАТЬ	(3,3)	(0,5)
	СОЗНАТЬСЯ	(5,0)	(1,1)

Матрица «дилеммы арестованного»

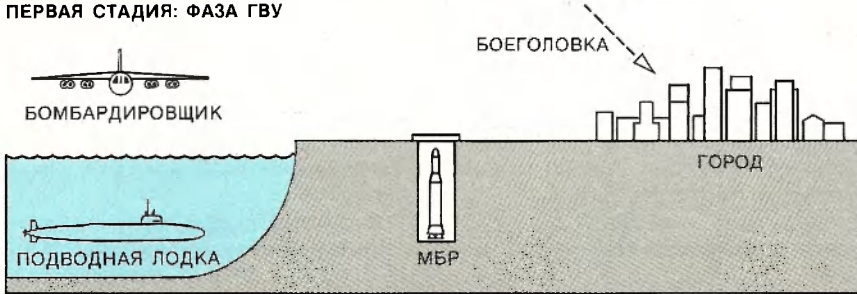
вует не более 50% ракет противника. Каждая сторона располагает космическими минами, запускаемыми на орбиты, проходящие вблизи от элементов СПРОКБ противника. Таким образом, сторона, нанеся первый удар, может уничтожить и систему противоракетной обороны, и МБР, и

населенные пункты противника. СПРОКБ нападающей стороны останется в неприкосновенности и сможет заблокировать любую последующую атаку баллистических ракет, запущенных с подводных лодок противника.

Пять основных матриц игры отражают относительные уровни неста-

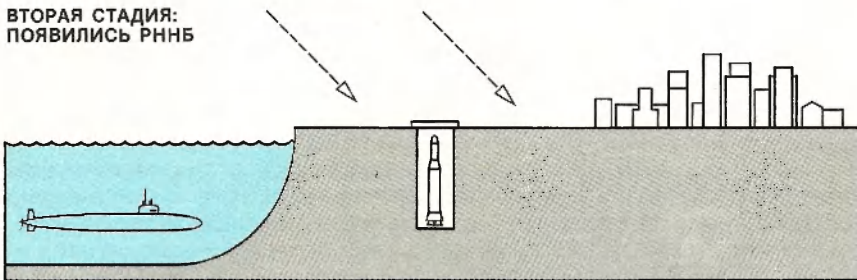
бильности на описанных выше пяти стадиях (см. рисунок внизу). Играющие переходят от одной основной матрицы к следующей только в том случае, если на данной стадии ни один из них не атакует. Однако перспектива нападения становится все более заманчивой, потому что, с одной сторо-

ПЕРВАЯ СТАДИЯ: ФАЗА ГВУ



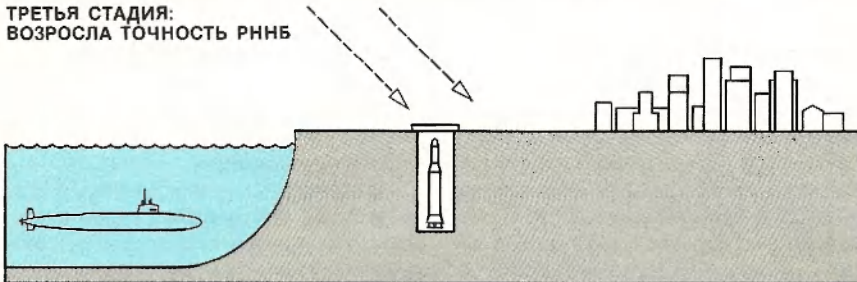
		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЬ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-74,-63)
	АТАКОВАТЬ	(-63,-74)	(-74,-74)

ВТОРАЯ СТАДИЯ: ПОЯВИЛИСЬ РННБ



		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЫ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-43,-19)
	АТАКОВАТЬ	(-19,-43)	(-43,-43)

ТРЕТЬЯ СТАДИЯ: ВОЗРОСЛА ТОЧНОСТЬ РННБ



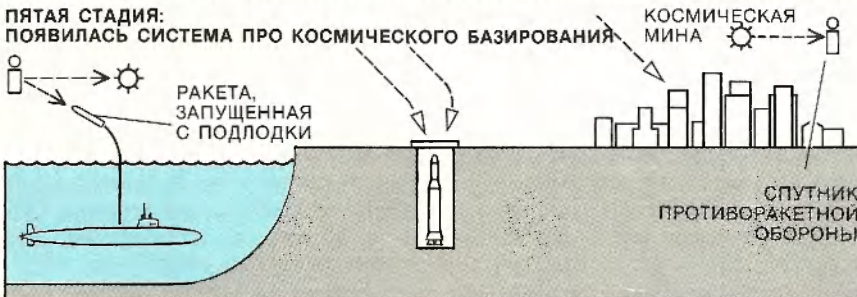
		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЫ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-51,-5)
	АТАКОВАТЬ	(-5,-51)	(-45,-45)

ЧЕТВЕРТАЯ СТАДИЯ: ПОЯВИЛИСЬ МАНЕВРЕННЫЕ БОЕГОЛОВКИ



		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЫ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-71,33)
	АТАКОВАТЬ	(33,-71)	(-62,-62)

ПЯТАЯ СТАДИЯ: ПОЯВИЛАСЬ СИСТЕМА ПРО КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ



		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЫ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-99,55)
	АТАКОВАТЬ	(55,-99)	(-90,-90)

Пять основных стадий игры «После ГВУ» и соответствующие им матрицы

ны, возрастает положительный баланс как результат такого решения, а с другой, беспокоит сознание, что противник подвергается тому же соблазну. Последние две матрицы представляют собой по существу «дилемму арестованного».

Как писал популяризатор математических игр Д.Р. Хофштадтер, эта дилемма возникает, когда поблизости от места преступления полиция находит двух человек и задерживает их для допроса. Как обычно, подозреваемых допрашивают по отдельности, чтобы они не смогли согласовать свои версии. Допустим, что оба подозреваемых виновны. Никто из них не знает, сознается или нет соучастник. Если сознаются оба, то эта пара окажется в тяжелом положении. Но если сознается кто-то один, то он произведет более благоприятное впечатление и получит меньший срок, чем не сознавшийся соучастник.

На языке рассматриваемой дилеммы каждый из арестованных может либо сохранить солидарность со своим партнером, отрицая свое участие в преступлении, либо нарушить солидарность, во всем сознавшись. Описанной дилемме соответствует стандартная матрица (см. рисунок на с. 110). Я назвал арестованных «он» и «она» в надежде немного оживить логические рассуждения этим романтическим элементом. Если он и она солидарны и отказываются от содеянного, то оба получают за это «награду» по 3 очка. Если оба сознаются, то в итоге получают только по одному очку. Но если сознается только один арестованный, то он (или она) выигрывает пять очков, в то время как не сознавшийся соучастник не выигрывает ничего.

Какое решение лучше принять в такой игре? Стратегия «дилеммы арестованного» оценивается не по одной игре, а по результатам многих игр. Усредненный выигрыш уже становится достаточно представительным критерием для выбора правильной стратегии.

		ОНИ	
		ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	АТАКОВАТЬ
МЫ	ВОЗДЕРЖАТЬСЯ	(3,3)	(-71,33)
	АТАКОВАТЬ	(33,-71)	(-62,-62)

Основная матрица четвертой стадии игры «После ГВУ»

В 1983 г. Р. Аксельрод из Института обществоведения организовал в Мичиганском университете турнир по игре «дилемма арестованного». Участниками турнира были компьютерные программы, реализующие различные стратегии игры. Каждая пара программ играла по 1000 матчей. Абсолютным чемпионом стала очень простая программа под названием TIT FOR TAT (око за око). Стратегия этой программы заключалась просто в том, чтобы всегда повторять ход, только что сделанный программой — оппонентом.

Матрицы игры «После ГВУ» аналогичны матрицам «дилеммы арестованного». Вместо слов «молчать» и «сознаться» я подставил соответственно слова «воздержаться» и «атаковать». Отметим также, что числа в матрицах игры «После ГВУ» обычно больше, как это видно на примере матрицы четвертой стадии игры (см. рисунок на с.111). Соотношение между величинами «выигрыша» типично для всех ситуаций, подобных дилемме арестованного: выигрыш при безнаказанном нападении равен 33, выигрыш при взаимном воздержании равен 3, выигрыш при запоздалом ответном ударе равен -62 (т. е. проигрыш), и, наконец, в наихудшем случае, когда удар противника остался без ответа, выигрыш равен -71 (тоже проигрыш). Эти величины образуют строго убывающую последовательность. Остается лишь надеяться, что играющие в игру «После ГВУ» также будут придерживаться стратегии «око за око», обеспечивая тем самым не только приличный счет для каждого игрока, но и, если можно так выразиться, поддержание мира во всем мире.

Хомер-Диксон и Оливо приложили немало усилий, чтобы придать игре реалистичный характер как в плане числовых соотношений в матрицах, так и в плане комментария, сопровождающего каждую ситуацию и выдаваемого на распечатку. При создании этой игры авторы отчасти преследовали цель смоделировать влияние научно-технического прогресса на стратегические взаимоотношения между США и СССР, однако их первоначальная гипотеза относительно стратегии, которой будут придерживаться играющие в эту игру студенты (среди прочих игроков), не выдержала проверки. Играющие обычно не дожидались, пока матрицы игры установились в достаточной мере нестабильными, прежде чем начать боевые действия. В 35 играх из 100, сыгранных в Массачусетском технологическом институте, одна из сторон наносила ядерный удар еще тогда, когда

перспектива взаимного уничтожения оставалась практически неминуемой.

Нужно заметить, что перед игрой студентам подробно объяснили, как разворачиваются события в игре, а также просили их давать письменные объяснения по поводу выбираемых ходов. И все же, наверное, нам повезло, что студенты принимали свои решения лишь в игре, а не в реальных условиях, когда одно такое решение может погубить весь мир. Остановимся теперь на том, какими соображениями руководствовался Хомер-Диксон при построении матриц этой игры и как играющие реагировали на информацию, содержащуюся в матрицах.

Численная оценка возможных ходов, содержащаяся в каждой матрице игры «После ГВУ», складывается из трех компонент, отражающих соответственно такие факторы, как военное превосходство, экономическое и социальное благополучие государства, а также стабильность политической власти. Наименьший выигрыш, равный 3, складывается из трех единиц, по одной на каждую из перечисленных компонент. Такой выигрыш получает сторона за короткий период между двумя последовательными ходами при условии, что в этот период сохраняется мир, и, таким образом, каждая из компонент имеет небольшой положительный прирост. Наибольшее изменение в ту или иную сторону, обусловленное какой-то одной компонентой, может быть равно 33 условным единицам.

Вот, например, как Хомер-Диксон рассчитал выигрыш в основной матрице на третьей стадии игры, который получает сторона, совершающая нападение при условии, что противоположная сторона воздерживается от удара на данный момент. Военная компонента, оцениваемая перед этим ходом как +5, должна быть уменьшена на 3 единицы, чтобы учесть отрицательные последствия потенциального ответного удара. Цифра 3 была получена из следующих соображений. Если нападающая сторона нанесет всеми имеющимися средствами предупредительный удар по стратегическим силам противника, то она сможет уничтожить их на 75%. В этом случае сторона, атакуемая первой, сможет причинить ущерб другой стороне, оцениваемый приблизительно как $(75/100) \times 33 = 24$ условным единицам. Поскольку у стороны, подвергшейся нападению, остается лишь 25% ее стратегических вооружений, она может причинить ущерб стороне, совершившей нападение, оцениваемый лишь как $(25/100) \times 24 = 6$ условным единицам. Этот потенциально

возможный урон, равный 6, уменьшается вдвое ввиду неопределенности относительно того, сможет ли сторона, подвергаясь нападению, нанести ответный удар даже оставшимися 25% своих стратегических сил.

Итоговая оценка +2 военной компоненты, остающаяся после того, как 3 единицы (потенциальный урон от возможного контрудара) были вычтены из 5 (оценка военного превосходства), складывается затем с оценками изменений в экономическом и социальном благополучии (-2) и политической стабильности (-5). Предположительно сторона, первой совершившая нападение, понесет в результате ответного удара некоторые потери в населении и промышленном потенциале. Правительство же этой стороны (в разумном мире) также подвергнется всеобщему осуждению за развязывание войны. Таким образом, в итоге сторона, наносящая предупреждающий удар, получает $+2 - 2 - 5 = -5$ очков.

Комментарии, печатаемые компьютером по ходу игры «После ГВУ», тщательно описывают все стратегические аспекты сложившейся на данный момент ситуации. Авторы игры Хомер-Диксон и Оливо объясняют также играющим, как числовые элементы матриц отражают текущую ситуацию и возможные последствия того или иного решения. Поскольку всего в игре насчитывается 110 различных матриц, то она содержит также и 110 сценариев, комментирующих игроку в виде текста ту матрицу, с которой он имеет дело на данный момент.

Война начинается, как только один (или оба) из игроков наносит удар по противнику. В этот момент игра переключается от одной из основных матриц, а именно от той, которая предшествовала нападению, к той или иной побочной матрице. Война может привести к полному уничтожению обеих сторон (в этом случае игра заканчивается) либо вернуть противников к одной из предыдущих стадий и соответственно матриц, чтобы они могли постепенно восстановить свой потенциал.

Хотя играющим настойчиво советовали делать все возможное, чтобы получить максимальное количество баллов, они, как видно, принимали в расчет и множество других факторов. Не имея возможности наблюдать друг за другом или общаться в какой-либо форме, они начинали нервничать и подозревать худшее. Вот, например, как двум играющим — назовем их условно «Строка» и «Столбец» — удалось выжить в игре «После ГВУ».

Строка вела себя как совершеннейший пацифист. Как зафиксировал ее компьютерный дневник, Строка не пыталась любой ценой увеличить счет своим баллам, а руководствовалась чисто моральными принципами. «Я играю не на очки. В этой игре я хочу главным образом следовать моим убеждениям. Вероятно, я буду все время воздерживаться от нападения... и надеюсь, что мой оппонент будет играть так же, как и я».

Согласно записям Столбца, в течение нескольких первых ходов он не совершал нападения просто потому, что выигрыш, сопутствующий этому решению, был недостаточно велик. Столбец помимо желания максимально увеличить количество своих баллов пытался еще и максимально увеличить разницу между своими баллами и баллами Строки. Уже на ранних стадиях игры он признавался, что боится нападения со стороны Строки.

Наступил момент, когда Столбец уже не мог противостоять искушению напасть на противника. Это привело Строку в замешательство. Она подумала, что Столбец атаковал либо потому, что боялся нападения со стороны Строки, либо потому, что хотел сделать игру интереснее. Строка надеялась, что Столбец не совершит нового нападения, на этот раз из опасения, что Строка планирует отомстить ему.

На следующих двух этапах оба игрока воздерживались от активных действий. Строка теперь уже была уверена в том, что Столбец не нарушит перемирия, поскольку она, Строка, доказала ему свою приверженность мирной политике. Однако эта ситуация была интерпретирована Столбцом совершенно по-иному. Столбец пришел к выводу, что Строка просто потихоньку восстанавливает силы, с тем чтобы атаковать Столбца более эффективно. Поэтому уже на следующем ходу Столбец совершил новое нападение. Он начал выказывать нервозность по поводу продолжающегося непротравления Строки. «В конце концов я хочу свести ее к такому низкому уровню, что, даже если она решит ответить контрударом, ее счет станет отрицательным».

После игры Строка задумалась о своей стратегии и решила, что ее следует несколько пересмотреть. Ее новая стратегия, все еще диктуемая моральными принципами, уже содержала в себе и определенный элемент принципа «око за око»: «Главным образом моя стратегия заключается в политике «неприменения первым». В случае если противник все же атакует, я немедленно нанесу ответный удар и

буду в последующем действовать в той же манере, пока мой оппонент либо не прекратит военных действий, либо не покажет, что не остановится ни перед чем для достижения полной победы. В любом из этих случаев я начну воздерживаться от нападений, поскольку нет никакого смысла в том, чтобы уничтожать всех его людей тоже, если он решил уничтожить всех моих. После того как мой оппонент нарушит мир, я приму стратегию «неприменения первым» и буду следовать ей вплоть до стадии, когда на вооружение поступят МБР с маневренными боеголовками. На этой стадии я совершу нападение, чтобы избежать риска одностороннего нападения со стороны противника, которое сделает меня совершенно незащитной... Хотя такой подход может показаться излишне резким, он, по-видимому, является наилучшим способом обеспечить минимальное количество жертв среди мирного населения».

На основании опыта, извлеченного из игр между студентами, Хомер-Диксон и Оливо пришли к выводу, что играющие интерпретировали количественные показатели матриц не так, как им было предложено, и руководствовались другими критериями. Иногда игроки стремились максимально увеличить разность между количеством своих баллов и баллов противника. Этим, наверное, можно объяснить, почему многие решили начать боевые действия почти с самого начала. Другие стремились к тому, чтобы максимально увеличить сумму своих баллов и баллов противника. Этим можно объяснить, почему 20% играющих так ни разу и не совершили нападения. Кое-кто пытался добиться стратегического превосходства над оппонентом или же, наоборот, руководствовался чисто моральными принципами.

Один из студентов подытожил свои впечатления от игры в специальном эссе, написанном им на эту тему. Я процитирую некоторые из его заключительных замечаний: «Данные, представленные игрокам в модели, оказались достаточно заманчивыми для нескольких студентов, нанесших массивные удары друг по другу... Это как-то не вяжется с политической теорией равновесия или равновесия за счет устрашения. Если главы государств будут видеть поле игры на своих видеотерминалах подобно студентам, то игра, участниками которой мы все являемся, может закончиться аналогично игре PACMAN, когда все точки на экране оказываются съеденными, а в разменном автомате нет ни одного пятака».

Хомер-Диксон в настоящее время

аспирант МТИ и работает в Кембриджском научном центре по изучению международных отношений. Оливо — работник фирмы Thinking Machines («Думающие машины»), также в Кембридже. Программа игры «После ГВУ» была создана при финансовой поддержке фирмы IBM и DEC (Digital Equipment Corporation) в рамках проекта Athena, выполняемого в МТИ с целью изучения роли компьютеров в обучении. В создании программы «После ГВУ» принимал также участие профессор Х. Олкер с кафедры политических наук МТИ. Он воспользовался программой в своих занятиях со студентами.

Я БЫЛ ПОРАЖЕН обилием читательских откликов на статью, опубликованную в августовском номере журнала и посвященную алгоритмическим головоломкам. На этот раз не нужно было писать никаких программ, требовалось лишь построить несколько алгоритмов подзаправки автомашины в пустыне и железнодорожных маневров. Несколько сот «одноколейных умов» прислали мне результаты своих исследований, и мне приятно сознавать, что я дал людям столько пищи для размышлений.

Алгоритмическая головоломка — это задача, имеющая алгоритмическое решение, т. е. рецепт или процедура, следуя которой, можно прийти к заданной цели. Головоломки с поездами были проще отчасти потому, что я привел решение одной из них. Конечно, очень трудно было отобрать лучшее решение из множества ответов, присланных ко второй головоломке, в которой требовалось развернуть весь состав, пользуясь лишь одним тупиком, вмещающим только один вагон. Отобрав более или менее произвольно одно из лучших решений, присланных раньше других, я представляю здесь алгоритм, предложенный Д. Ауенбаем из Уэст-Ковина (шт. Калифорния). Буквой *A* обозначен участок железнодорожного полотна от Задаченска до тупика, *B* обозначает сам тупик и *C* — основной участок пути от тупика *B* до Решенска. Через *P_k* обозначен *k*-й вагон поезда.

Расцепить поезд *P*
вперед к *B*
назад к *C*
for $k = 1$ to n
вперед к *A*
прицепить *P_k*
назад к *C*
вперед к *B*
отцепить *P_k*
назад к *C*
вперед к *A*

назад к *B*
прицепить *P_k*

В другом варианте решения процедура начинается не с первого вагона, а с последнего. Как подметили некоторые читатели, приведенное выше решение требует затрат, пропорциональных n^3 , поскольку n вагонов поезда нужно протаскать назад и вперед n раз на пути, длина которого приблизительно равна длине состава из n вагонов.

В первой задаче о разведчике пустыни требовалось определить, какое расстояние сможет преодолеть патрульная автомашина при наличии n цистерн с горючим. В исходном состоянии горючее хранится в цистернах на базе, емкость каждой цистерны равна 50 галлонам. Автомашина может везти в кузове только одну цистерну. Каким образом следует расположить в пустыне склады, доставив туда предварительно горючее все той же автомашиной, чтобы максимально увеличить расстояние, на которое автомашина сможет удалиться от базы? В статье я привел алгоритм, гарантирующий возможность проехать расстояние 600 миль при наличии двух цистерн с горючим. Однако оптимальное расстояние, как показали У. Липп и многие другие читатели из Милфорда (шт. Коннектикут), равно 733,33 мили. В своем живо написанном письме под заглавием «Побьем рекорд! Даешь 733 мили всего на двух цистернах!» Липп показал, как можно превзойти результат 666 миль, о возможности достижения которого я говорил в статье. Вот его алгоритм (в слегка отредактированной форме):

Заправить автомашину из первой цистерны
Погрузить вторую цистерну
Вперед на 50 миль
Разгрузить вторую цистерну
Назад на базу
Заправить бак из первой цистерны
Погрузить первую цистерну
Вперед на 100 миль
Разгрузить первую цистерну
Заправить бак из первой цистерны
Назад на 50 миль ко второй цистерне
Погрузить вторую цистерну
Вперед на 50 миль к первой цистерне
Заправить бак из первой цистерны
Вперед на 33,33 мили
Разгрузить вторую цистерну
Назад на 33,33 мили к первой цистерне
Погрузить первую цистерну

Вперед на 33,33 мили ко второй цистерне

На этом этапе патрульная автомашина находится уже на расстоянии 133,33 мили от базы. Теперь нужно просто погрузить вторую цистерну (еще полную) и проехать вперед на расстояние 600 миль.

Обобщая этот алгоритм, мы не сможем прийти к оптимальному алгоритму при числе цистерн $n > 2$. Например, при его помощи мы не сможем достичь оптимального расстояния 860 миль при наличии 3 цистерн с горючим. Я приведу общий алгоритм (для числа цистерн $n \geq 6$) через месяц, а также дам решение ко второй задаче о разведчике пустыни.

Издательство
МИР
предлагает:

Кёршан Б., Новембер А.,
Стоун Дж.

ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАМОТНОСТИ

Перевод с английского
Пособие по основам информатики и вычислительной техники для средних учебных заведений. В доступной форме излагаются основные принципы построения, программирования и применения персональных компьютеров при решении различных практических задач. В качестве основного языка программирования используется Бейсик, что позволяет быстрее освоить принципы работы на персональном компьютере. Обсуждаются перспективы развития вычислительной техники, в частности устройств синтеза и распознавания речи, оцувствленных роботов, элементов систем искусственного интеллекта. Наличие многочисленных иллюстраций, хорошо проработанная методика изложения существенно облегчают усвоение материала.

Для учащихся средних учебных заведений, студентов вузов и техникумов, всех желающих изучить основы вычислительной техники и программирования.

1988, Цена 1 р. 90 к.



Нелегкий труд искусствоведа

В СТИХОТВОРЕНИИ «Ода Греческой Вазе» Джона Китса есть строки:

«В прекрасном — правда,
в правде — красота,
Вот все, что знать вам
на земле дано»*
(перев. Г. Кружкова)

Так ли просто обстоит дело в действительности? Возьмем, к примеру, статуэтку, изображающую припавшего к земле оленя и проданную в 60-х годах Галерее искусств Фриера в Вашингтоне. Считалось, что она была создана в Древнем Китае около 3000 лет назад. Однако недавно с помощью метода, называемого термолюминесцентным анализом, удалось установить, что она была обожжена менее 200 лет назад. «Это подделка, изготовленная, возможно, в нашем веке», — сказал хранитель галереи У. Чейз, вынося чудесную фигурку в одну из задних комнат музея. «Очень жаль, — добавил он, глядя на экспонат с грустью. — Это прелестная вещь».

Искусство подделки не ново. Еще римские скульпторы делали копии классических греческих статуй и продавали их как оригиналы. Не новым является и применение технических средств для анализа произведений искусства: одним из первых предметов, которые Рентген исследовал на изобретенном им приборе, была карти-

* Библиотека мировой литературы для детей. Том «Поэзия народов мира». — М.: Детская литература, 1986, с. 106. — Прим. ред.

на. В последние годы стали применяться все более чувствительные (по сравнению с человеческим глазом) методы анализа, однако возросший интерес к предметам искусства привел к увеличению числа подделок и усложнению способов их изготовления.

В результате даже специалист самой высокой квалификации не в состоянии чисто визуально решить вопрос о подлинности того или иного произведения искусства. Музеи все больше начинают полагаться на помощь технических методов анализа как при приобретении новых вещей, так и в отношении уже имеющихся экспонатов. Однако даже при использовании чувствительных научных приборов определение подлинности произведения искусства остается чрезвычайно трудной задачей. Не так давно, например, газета «New York Times» писала о том, что результаты химического и рентгеновского анализа породили сомнения в подлинности известной бронзовой кошки, находящейся в собрании древнего египетского искусства в Метрополитен-музее. Несколько месяцев спустя сотрудники музея заявили, что они до сих пор не могут определить, создана ли эта вещь в древнее или в новое время.

Различные методы анализа разрабатывались в основном не для того, чтобы обнаруживать подделки, а для того, чтобы помочь пролить свет на происхождение и историю замечательных творений прошлого. П. Мейерс из Музея искусств графства Лос-Анджелес отмечает, что «свидетельствование подлинности — это лишь одна из многих выгод, которые дает научный анализ». Например, Мариан Эйнсуорт из Метрополитен-музея использует метод инфра-

красной рефлектографии, чтобы выявить рисунок под живописью, сделанный углем или свинцовым карандашом и обнаруживаемый на многих картинах под слоем красок. При этом картину облучают нагревательными лампами и «рассматривают» с помощью видеокамеры с автоматизированной обработкой данных, снабженной инфракрасным фильтром.

На инфракрасном снимке фламандского пейзажа XVI в. Эйнсуорт обнаружила тонкий едва заметный набросок фигур, деревьев и замков, которые на самой картине не изображены. «Это все равно, что натолкнуться на не известные никому архивы», — сказала она. Кроме того, знание особенностей стиля данного художника может послужить исследователю для обнаружения подделки.

Даже по числу подделок, появляющихся на рынке, можно сделать вывод, что вопрос о подлинности возникает весьма часто. О. Маскарелла из Метрополитен-музея утверждает, что более 50% всех вещей с Ближнего Востока, которые предлагают ему посредники, являются подделками или по крайней мере неправильно идентифицированы. Многие из них в конце концов оседают в музеях и частных коллекциях.

Какую технику должны использовать музеи, чтобы избежать приобретения подделок? Почти во всех музеях имеются традиционные микроскопы и рентгеновские аппараты. Крупные музеи оснащены гораздо лучше. Так, например, Национальная галерея в Вашингтоне располагает рентгеновским флуоресцентным спектрометром и газовым хроматографом, с помощью которых можно анализировать соответственно элементный и химический состав материалов. Такой анализ позволяет, например, определить, содержит ли картина,



НА ФЛАМАНДСКОМ ПЕЙЗАЖЕ XVI в. при анализе методом инфракрасной рефлектографии проступает темный рису-

нок под живописью (слева). Рефлектограмма получена М. Эйнсуорт из Метрополитен-музея.

предположительно относящаяся к XIX в., титановые белила, которые начали производиться лишь в XX в.

Музеи вынуждены обращаться в научные лаборатории, чтобы получить доступ к более мощной аппаратуре. Сотрудники Метрополитен-музея проанализировали распределение в картинах различных химических элементов и соответственно красок, которые из них состоят, с помощью ядерного реактора в Брукхейвенской национальной лаборатории. При таком анализе, называемом нейтронно-активационной радиографией, картина, которую помещают перед реактором, поглощает тепловые нейтроны. Через определенные промежутки времени элементы, входящие в состав материала картины, начинают испускать гамма-излучение, которое регистрируется на фотопластинках.

Методы исследований постоянно совершенствуются и обновляются. Консервационный институт Гетти в Марина-дел-Рей (шт. Калифорния) изучает, например, возможность применения лазерной флуоресцентной спектроскопии для анализа масел и смол в слое живописи. При облучении лазером эти материалы начинают флуоресцировать, и по длинам волн этого излучения можно определить их состав. Разрабатываются также способы представления в цифровом виде микрофотографий поверхности скульптур и анализа этой информации на компьютере с целью выявления неоднородностей поверхности, которые позволяют отличить оригинал от подделки.

Иногда технический анализ дает однозначный ответ. Так, сотрудники Музея Изабеллы Стюарт Гарднер в Бостоне недавно исследовали с помощью инфракрасной камеры картину, которая, как считалось, принадлежит кисти Рембрандта, и обнаружили подпись художника. Оказалось, что это подпись одного из учеников великого мастера. Гораздо чаще результаты анализа допускают разную интерпретацию. Поясним сказанное на примере термолюминесцентного анализа. Метод основан на том обстоятельстве, что с течением времени глина поглощает радиацию и испускает ее только при нагревании. Если нагреть глину и измерить испускаемое ею излучение, можно грубо оценить, когда в последний раз ее нагревали. Если скульптуру реставрировали, повторно покрывали глазурью или если она побывала в пожаре, анализ, к сожалению, укажет на дату такого события, а не на время первоначального обжига. Кроме того, мошенники, зная о том, что для проверки обычно берется небольшой кусочек материа-

ла в нижней части статуи или посуды, могут приклеить «древнюю» ногу к современной статуе и т. д. Они могут также подвергать керамический предмет рентгеновскому облучению, увеличивая содержащийся в нем «запас» радиации и тем самым искусственно «старя» его. Чтобы определить, не подвергался ли предмет такому облучению, необходимы дополнительные исследования.

Г. Карриво из Национальной галереи отмечает, что большая часть полученной информации оказывается полезной лишь тогда, когда она сравнивается с результатами исследований заведомо подлинных работ. По его словам, в «опорной» информации такого рода наблюдается дефицит.

Необходимость в опорной технической информации является решающим фактором при установлении подлинности произведений современного искусства. Современное искусство — особенно удобная «жертва» мошенников, так как здесь не приходится имитировать древний возраст вещей. Однако надо усердно потрудиться, чтобы воспроизвести работы Клее или Миро на микроскопическом уровне. Имея в виду это обстоятельство, Ордонез проводит систематические исследования картин из собрания музея с помощью растрового электронного микроскопа, рентгеновского дифрактометра и поляризационного микроскопа. Под поляризационным микроскопом Ордонез, по ее словам, сразу же видит, что грязноватые желто-коричневые мазки на картинах Моне в действительности состоят из смеси различных красок.

Разумеется, «добросовестный» мошенник может точно так же узнать, какими материалами и методами пользовался художник. По мере совершенствования технических средств анализа совершенствуется и «искусство» подделки. «Они читают те же журналы, что и мы», — отмечает С. Флеминг из Музея Пенсильванского университета. Мошенники погружают скульптуры в кислоту или закапывают их в навоз, чтобы те покрылись «древней» патиной. Они используют лазеры, чтобы «картировать» рельеф древних монет, а затем с помощью специальных устройств создают такой же рельеф на поддельных монетах. Используется также высококачественная печатная техника для выполнения поддельных отпечатков.

Работа исследователя на этой стезе осложняется и другими трудностями. Флеминг отмечает мимоходом, что существуют различные «степени подлинности». Известно, например, что Рубенс начинал свои картины, а затем

отдавал их доделывать своим ученикам. «Некоторые вещи — стопроцентные подделки, — отмечает Чейз. — Другие составлены из оригинальных фрагментов или были переделаны в более позднее время ради вкусов публики».

Важно, чтобы исследователи имели в виду этот диапазон возможностей, особенно когда они изучают небольшие образцы. Р. Феллер из Университета Карнеги—Меллона вспоминает об одном своем коллеге, который обнаружил цинковые белила, относительно «молодую» краску, в картине американского художника, датированной началом XVIII в. «Он заключил, что картина не является подлинной, — вспоминает Феллер, — но оказалось, что она просто была ретуширована». «Он не получил ни гроша за проведенное исследование, — возмущенно говорит Феллер, — и доверие к нему было подорвано».

Некоторые специалисты признают, что невозможность однозначно решить вопрос о подлинности произведений искусства иногда угнетает их. Дж. Друрик из Института Гетти жалуется, что доказать подлинность какой-либо вещи практически невозможно (чего нельзя сказать о доказательстве того, что подделка является подделкой): «Тратишь огромные деньги, доказывая, что та или иная вещь является подлинной, как вдруг кто-то заявляет: "Эта рука кажется нерешительной"». — Но ведь это вопрос стиля». Другие настроены более оптимистично. «Иногда приходится иметь дело лишь с вероятностями, — говорит Мейерс. — Мнение одного человека противостоит мнению другого». «В науке нет машин, устанавливающих истину», — добавляет Карриво.

Что ж, вероятно, прав, все-таки Китс.

В глубинах темноты

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ представляют собой объекты, обладающие настолько большой плотностью и настолько сильным полем тяготения, что излучение оказывается «запертым» в них. Сначала считалось, что это одно из курьезных следствий общей теории относительности, которое вряд ли можно будет обнаружить во Вселенной. В начале 1970 г. ученые нашли довольно много звезд (наиболее заметная — Лебедь X-1), которые вращаются вокруг своих невидимых (темных) спутников-компаньонов. После того как в течение нескольких лет делались попытки найти другие объяснения, астрономы пришли к вы-

воду, что скрытые компоненты звездных систем скорее всего представляют собой черные дыры — сжавшиеся остатки звезд, в несколько раз больше Солнца, которые превратились в сверхновые.

Недавно четверо исследователей сообщили, что черные дыры, в несколько раз более массивные, чем Солнце, возможно, являются центральными объектами двух ближайших соседей Млечного Пути — гигантской спиральной галактики в созвездии Андромеды и ее небольшого спутника, эллиптической галактики М32, которые находятся на расстоянии 2 млн. световых лет от Земли. Это сообщение и другие косвенные данные, свидетельствующие о том, что наша Галактика содержит в центре черную дыру, позволяют предположить: такие необычайно плотные объекты, возможно, играют решающую роль в формировании многих, если не всех, галактик. Как заметил Д. Ричстоун из Мичиганского университета, вероятность этого практически равна единице.

Д. Ричстоун и А. Дресслер из обсерватории Маунт-Вильсон и Лас-Компанас утверждают, что они обнаружили признаки черной дыры в Туманности Андромеды, масса которой в 17 млн. раз больше массы Солнца и другой черной дыры в галактике М32, масса которой в 10 млн. раз больше массы Солнца. Их наблюдения подтверждают уже имеющиеся данные о галактике М32, полученные Дж. Тонри из Массачусетского технологического института, и о Туманности Андромеды, полученные Дж. Коменди из Доминионской астрофизической обсерватории в Виктории (пров. Британская Колумбия). Ричстоун указывает, что, судя по этим объектам, черные дыры в двойных звездах не очень велики по массе и размерам: в то время как скрытый компаньон Лебедя X-1, возможно, имеет в поперечнике несколько сот метров, размеры черной дыры в Туманности Андромеды могут достигать размеров земной орбиты.

Все последние результаты основаны на анализе доплеровского смещения света вблизи центров галактик. Поскольку наблюдается смещение в направлении как длинных, так и коротких волн (т. е. источники движутся как от Земли, так и к Земле), ученые пришли к выводу, что звезды вращаются вокруг галактического центра с большими скоростями. Затем они оценили, насколько велика должна быть скрытая масса, чтобы удерживать звезды на таких жестких маленьких орбитах. Этот метод не может быть применен к нашей Галактике, так как

ее ядро скрывают пылевые облака. Тем не менее некоторые ученые, в частности Ч. Таунс из Калифорнийского университета в Беркли и Р. Гензель из Института физики и астрофизики им. Макса Планка в Мюнхене, предположили, что интенсивное инфракрасное излучение и радиоизлучение, приходящее из центра нашей Галактики, свидетельствуют о наличии там черной дыры.

По-видимому, и другие галактики содержат черные дыры. Несколько десятилетий назад ученые предположили, что в ядре гигантской эллиптической галактики М87 имеется черная дыра, однако более поздние исследования показали ошибочность их выводов. Коменди исследовал свет, исходящий из более далеких галактик, чем Туманность Андромеды и М32, и обнаружил указания на то, что по крайней мере в трех из них есть черные дыры. Он и его коллеги признают, однако, что делать выводы о галактиках, более далеких, чем Туманность Андромеды и М32, на основании только наземных наблюдений очень трудно. «Вполне возможно, что мы сумеем это сделать только с использованием космического телескопа», — говорит Дресслер.

Тонри считает, что двойные системы, такие, как Лебедь X-1, все еще представляют наиболее сильное свидетельство в пользу существования черных дыр, поскольку теоретики не могут найти другого объяснения имеющимся данным. Он предполагает, хотя это и очень маловероятно, что невидимые центральные объекты в Туманности Андромеды и галактике М32 состоят из большого числа белых карликов или нейтронных звезд. Коменди отмечает, что такое скопление в конце концов может сжаться в черную дыру. «Другие объяснения данных, полученных при изучении Туманности Андромеды и М32, становятся все более ошеломляющими», — говорит он. — В природе могут быть отклонения, но обычно это не так».

Если новые результаты подтвердятся, они могут подкрепить те теории, которые связывают черные дыры как с галактиками, так и с их интенсивно светящимися «родственниками» — квазарами, считает Р. Нарайан из Аризонского университета. Распространено мнение, что сначала формируется галактика, а затем ее центр сжимается в нечто более плотное — черную дыру. Если сжатие продолжается, то эта новая галактика может достичь стадии, на которой энергия, высвобождаемая звездами и другими массивными объектами, падающими на черную дыру, будет ос-



ТУМАННОСТЬ АНДРОМЕДЫ и ее сосед — галактика М32 (круглый объект сверху), возможно, содержат в ядре черные дыры.

вещать остальную галактику. Удаленному наблюдателю это будет представляться не в виде размытого звездного облака, а в виде необычайно яркой светящейся точки — квазара. После того как черная дыра поглотит большую часть вещества в пределах своего поля тяготения, считает Нарайан, квазар может в конце концов превратиться в менее яркую и выглядящую более привычно галактику.

*Д. Хаузер, Дж. Хирт,
Б. Хоукинс*

**ОПЕРАЦИОННАЯ
СИСТЕМА MS-DOS:**

Популярное руководство

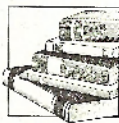
Перевод с английского
MS-DOS — операционная система для персональных компьютеров, под управлением которой можно использовать тысячи прикладных программ. В книге подробно обсуждаются все команды MS-DOS, их формат, параметры, ключи. Рассматриваются возможности реконфигурации системы, стандартные средства отладки, редактирования, загрузки и печати. Кратко описаны утилиты MS-DOS.

Для пользователей ПК и студентов вузов.

1987, 14 л. Цена 1 р. 20 к.



К трехсотлетию опубликования «Начал» Ньютона; первый контакт; беспозвоночные животные



ФИЛИП MORRISON

Дерек Гьётсен. НАСЛЕДИЕ НЬЮТОНА THE NEWTON HANDBOOK, by Derek Gijtsen. Routledge & Kegan Paul (\$59.95)

ПЯТОГО июля 1687 г. Эдмунд Галлей, секретарь Лондонского королевского общества, занимавшийся также издательским делом, написал из Лондона Исааку Ньютону, профессору Тринити-Колледжа Кембриджского университета, что «его книга наконец вышла из печати». Первое издание «Математических начал натуральной философии» увидело свет, и Галлей был первым его критиком и редактором. Книга была даже отпечатана за его счет тиражом 300 или 400 экземпляров у двух печатников. Королевскому обществу издание книги было не по карману. Галлей отослал в Кембридж Ньютону 20 экземпляров книги ин-квартио объемом 511 страниц, чтобы тот «подарил их своим друзьям». Затем Ньютон получил еще 60 экземпляров, которые он должен был передать книготорговцам на продажу по цене 9 шиллингов за экземпляр.

Отрадно, что трехсотлетие со дня выхода самой выдающейся книги периода становления современной науки отмечено появлением труда Дерек Гьётсена, историка науки, преподавателя Открытого университета. Рецензируемую книгу можно считать однотомной энциклопедией, посвященной Ньютону: в нее вошло около 300 статей, освещающих жизнь и деятельность ученого. Одна из самых больших статей объемом около 50 страниц посвящена «Началам». В ней говорится обо всех изменениях, которые претерпевала эта работа Ньютона, сравниваются три ее издания, вышедшие при жизни автора. Предполагается, что цена сохранившегося первого издания книги может составлять на сегодняшний день около 20 тыс. фунтов. В то же время существует множество ее изданий на английском

языке, в том числе дешевых в бумажной обложке. Единственный полный перевод «Начал» был выполнен Эндрю Моттом в 1729 г. и с тех пор неоднократно пересматривался и переиздавался.

В течение двух последних десятилетий вышло в свет 7 томов переписки Ньютона, 8 томов его математических работ, а также двухтомное издание «Начал» по-латыни. В дополненное к двухтомнику выпущена книга, в которой рассказывается об истории создания и публикации этого труда Ньютона. В этот же период издано несколько биографий Ньютона и посвященных ему монографий.

В подготовке всех этих публикаций использовался в основном один и тот же источник: собрание рукописей Ньютона, принадлежавшее долгие годы графам Портсмутским. Они приобрели право на документы после того, как родственники покойного ученого перессорились из-за права владения ими. Большая часть этих рукописей оставалась «непрочитанной, неизученной и никому не известной на протяжении 200 лет». Даже после того как 100 лет назад они поступили в фонд библиотеки Кембриджского университета и были каталогизированы, их прочтение требовало огромного труда. Более половины рукописей (около 3,5 млн. слов), составляют труды по теологии, хронологии и алхимии. Лишь после того как часть рукописей появилась на аукционе в 1936 г., к ним было привлечено внимание научной общественности и началось их тщательное изучение.

Ньютон приступил к работе надписанием «Начал» в 1684 г., после того как его посетил в Кембридже Галлей. Во время этого визита он спросил Ньютона, каковы, по его мнению, будут траектории движения планет, если сила взаимодействия между ними обратно пропорциональна квадрату расстояния. «Я уже рассчитал их», — ответил Ньютон. Вскоре он

прислал Галлею краткую статью, содержащую эти расчеты. В ноябре того же года Галлей вновь посещает Ньютона, чтобы уговорить его написать более полный труд, который собиралось выпустить в свет Королевское общество. К апрелю 1686 г. Ньютон послал в Лондон первую часть окончательного варианта своего труда.

Подготовка к публикации третьей части «Начал» доставила Галлею гораздо больше хлопот. В этой части Ньютон предполагал применить свои геометрические теоремы к описанию взаимодействия планет Солнечной системы. В июне 1686 г. Галлей приветствовал эту идею, «которая заинтересует не только математиков, но и естествоиспытателей». Однако вскоре Ньютон узнал о том, что Гук настаивал на собственном приоритете (в открытии закона всемирного тяготения. — *Ред.*). Вот выдержка из знаменитого письма Ньютона Галлею: «Я намерен отказаться от написания третьей части. Философия — такая сутяжница, что каждый, кто имеет с ней дело, может оказаться втянутым в судебный процесс». Галлей привел все возможные доводы, пытаясь убедить Ньютона не отказываться от первоначального замысла. В конце концов ему это удалось: окончательный вариант рукописи он получил в апреле 1687 г.

Однако на этом история создания «Начал» не заканчивается. 29 сентября 1687 г. Ньютон в соответствии с установленными правилами сдал в университетскую библиотеку текст ежегодно читаемого им цикла лекций. Скорее всего они не были прочитаны по причине отсутствия слушателей. Человек, служивший в то время его секретарем, вспоминал впоследствии, что «часто Ньютону приходилось ... за неимением слушателей обращаться к стенам». Текст лекций представляет большой интерес. Они впервые были опубликованы по-латыни и в английском переводе спустя 40 лет после смерти Ньютона. Содержание этих лекций представляет собой самый ранний вариант третьей части «Начал». Он носит название «Устройство нашего мира» и гораздо более доступен и содержит меньше математических выкладок, чем третья часть «Начал». Сам Ньютон отмечал по этому поводу: «Я действительно написал третью книгу в весьма популярном изложении ... но затем ... я решил ... прибегнуть к форме законов».

Тех, кто знакомится с законом всемирного тяготения, может озадачить тот факт, что гравитационное взаимодействие обычных предметов друг на друга никак не ощущается в повсед-

невной жизни. Яблоко и Луна тяготеют к центру Земли, однако мы не замечаем воздействия одного яблока на другое. В «популярном варианте» «Начал» Ньютон объяснял это тем, что сила притяжения между двумя предметами настолько мала, что ее действие заметно лишь в космических масштабах. (Такое объяснение отсутствует в самих «Началах».) «И даже высочайшая гора» недостаточно велика, чтобы ощущалось ее притяжение, хотя Ньютон и приводит вычисления ее гравитационного воздействия.

Через 20 лет после смерти Ньютона Пьер Бугер в Перуанских Андах измерил силу, с которой горная вершина притягивала отвес.

Ньютон всегда утверждал, что ему рано пришла в голову мысль о том, что движением Луны и падающего яблока управляют одни и те же силы, и что он продолжал раздумывать над ней в университетские годы. Однако еще за 5 лет до первого визита Галлея в Кембридж Ньютон был еще далек от того, чтобы окончательно сформулировать закон всемирного тяготения. В этот период Гук направил Ньютону несколько писем, содержащих расчеты планетных орбит и законы действия сил. Все трое, Гук, Галлей и Ньютон, занимались проблемой воздействия силы притяжения на орбиты. В 1680 г. появилась яркая комета; астрономы зарегистрировали ее приближение к Солнцу, а затем отдаление от Солнца. Ньютон в то время считал, что они имеют дело с двумя кометами, поскольку он полагал, что кометы должны двигаться по прямой. Джон Флемстид придерживался другой точки зрения и сказал об этом Ньютону. Однако лишь в 1685 г. Ньютон признал ошибочность своей точки зрения. К этому времени он пришел к выводу, что кометы тоже подвластны закону всемирного тяготения и изменяют свою траекторию в результате притяжения к Солнцу. Около трети последней части «Начал» посвящено природе комет и их движению.

Боб Коннолли, Робин Андерсон. ПЕРВЫЙ КОНТАКТ
FIRST CONTACT, by Bob Connolly and Robin Anderson. Viking Penguin, Inc. (\$ 19.95)

ГОРЫ на острове Новая Гвинея протянулись более чем на 1500 км с запада на восток. Некоторые вершины этих гор превосходят по высоте пики Альп. К горным хребтам примыкают широкие прибрежные низ-

менности, покрытые влажными густыми лесами и высокими травами. Европейцы не слишком-то спешили на Новую Гвинею: согласно документам, 100 лет назад в северной части территории, ныне занимаемой государством Папуа-Новая Гвинея, площадь которого вдвое превышает площадь шт. Флорида, еще не поселился ни один европеец. Колониальные владения простирались лишь на несколько десятков километров в глубь острова, и считалось, что все одномиллионное (на конец первой мировой войны) население Папуа жило вблизи побережья, занимаясь сельским хозяйством и рыболовством. Для плантаторов, вербовщиков наемных рабочих, миссионеров и торговцев аборигены являлись соответственно рабочей силой, паствой и покупателями. В восточной части острова насчитывалось несколько сотен колонистов к тому моменту, как власть над Папуа и северо-восточной частью острова, ранее принадлежавших Великобритании и Германии, была передана Австралии. (Западная часть острова, являющаяся частью Индонезии, здесь не рассматривается.)

Две самые крупные реки в Папуа-Новой Гвинее — это Флай и Сепик. Обе берут свое начало высоко в горах, на окутанных туманами склонах, затем Флай течет к югу, а Сепик — к северу. В долинах этих рек живет множество разных племен, численность которых по направлению к горам заметно убывает. Вполне естественно было предположить, что в самих горах можно встретить разве что редкие племена кочевников-горцев, которые традиционно выменивают декоративное перо на каури и жемчужные раковины. На всех старых картах на месте нагорья в Папуа изображалось большое белое пятно размером с Шотландию, и мало кто сомневался, что эти места непролазны, дики и пустыны. И вдруг в 1926 г. у северного побережья острова в руслах рек было найдено золото...

В мае 1930 г. двое молодых золотоискателей-австралийцев, Майкл Лихи и Майкл Двайер, сопровождаемые пятнадцатью нанятыми в качестве носильщиков и телохранителей туземцами с побережья, отправились в горы вверх по реке на поиски нового прииска. Они начали свой путь от небольшого поселения в предгорьях, основанного лютеранскими миссионерами, и после однодневного тяжелого подъема достигли перевала. Здесь путникам открылась поразительная картина — перед ними раскинулись луга, покрывающие протяженную долину, испещренную множеством ручьев. К ночи они увидели необычное

зрелище: вся равнина осветилась огнями костров.

На восходе солнца местные жители — мужчины, вооруженные луками и стрелами, и женщины, несущие угощение, — вышли приветствовать гостей. Окруженные толпой радушных туземцев, старавшихся не только догнаться до них, но и обнять и угостить сладким тростником, путешественники проследовали мимо бесконечного числа садов, обнесенных живой изгородью. В садах виднелись длинные ряды посадок бобов, сахарного тростника и сладкого картофеля. Всюду в селении бродили откормленные свиньи.

Время от времени дружелюбные туземцы, сделав предупредительный жест, переставали сопровождать их — впереди была территория соседей — и вскоре пришельцев окружала новая толпа радостных и взволнованных людей. Спустя неделю путешественники достигли возвышенности и смогли оглядеть окрестности. На одной из старых фотографий мы видим небольшую рощицу, окружающую церемониальную площадку, вокруг которой расположено около двадцати бревенчатых хижин, с примыкающими к ним большими ухоженными садами, а на расстоянии километра двух в любом направлении — снова такая же рощица, еще одно селение... Тысячи анклавов, разбитых на враждующие и дружественные союзы, политически разрозненных из-за различий в языке и вражды, существующей с древних времен, разместились на этой плодородной равнине. Местные люди не знали железа (за исключением нескольких вымененных стальных ножей и топоров), не знали малярии, ткачества, у них не было вождей, зато были «большие люди», которые умели и трудиться, и на пиру себя показать. И вот настал тот момент, когда жители этого нагорья наконец соединились со всем остальным человечеством.

Майкл Лихи был человек энергичный и талантливый. За 6 лет, которые он провел в горных селениях Новой Гвинеи, им сделано примерно 5000 снимков, а легкий самолет, который ему удалось выпросить у компании, занимающейся горными разработками, связал эти селения с дотоле неизвестным внешним миром. Впоследствии Лихи опубликовал книгу о людях, живущих в этих селениях.

Рецензируемая книга написана двумя австралийскими кинорежиссерами, увлекшимися этнографией. В начале восьмидесятих годов они отправились по пути, подробно описанному Лихи, чтобы отыскать людей, которые еще помнят те далекие време-



Майкл Лихи в 1934 г.

на, когда десятки тысяч людей впервые увидели пришельцев из незнакомого им мира. Основу книги составляют около шестидесяти интервью, взятых у горцев, говорящих на восьми различных языках. Мы также найдем в ней множество фотографий (некоторые из них сделаны самим Лихи).

Предки горцев жили здесь с древних времен; археологические данные свидетельствуют, что некоторым садам более 9000 лет. Конечно, и раньше местные люди догадывались о существовании иных земель — иначе откуда бы взялись так высоко ценившиеся жемчужные раковины, эти красивые и загадочные предметы меновой торговли. О существовании океана никто не знал, а соль была настоящей роскошью.

Невесть откуда появившиеся пришельцы (Лихи и его спутники) не носились ни к врагам, ни к друзьям. По местным верованиям оставалось единственное — отнести их к духам. Конечно же, люди с белой кожей явились из страны мертвых — «вернулись наши усопшие предки!» Даже сам Лихи мог показаться какому-нибудь юноше недавно умершим отцом, и его приводили к родным для опознания. А уж туземцы, которых австралийцы наняли носильщиками, хотя и говорили на непонятном тарбарском наречии, однако выглядели настолько привычно, что в них то и

дело со слезами признавали покойных родственников. Так, один из свидетелей вспоминает: «Когда я увидел, что у него на руке не хватает полпальца, я сразу узнал в нем моего покойного двоюродного брата. Выражение его лица и то, как он говорил, смеялся — все было в точности, как у покойного».

А вдруг во сне они превращаются в скелеты? В одной деревне до сих пор помнят имена двух смельчаков, которые под покровом ночи отважились проникнуть в лагерь пришельцев и заглянуть в палатки. Может быть, им вовсе не надо справлять естественную нужду? Но нет, одному любопытному удалось, спрятавшись, подглядеть за ними в отхожем месте, и разрешить все сомнения. А к чему им весь этот ворох одежды? Может быть, это не одежда, а отстающая от тела кожа? Или же под одеждой им нужно что-то скрывать? Но и это оказалось заблуждением, как показали наблюдения за купающимися. Может быть, они прячут женщин в своих огромных тюках? Или вот какая догадка: золотоискатели проводили много времени за промывкой речного грунта. Испокон веку кости умерших традиционно сжигались, и пепел бросался в реку. Наверное, незнакомцы разыскивают свои останки!

Но самое главное, у пришельцев имелась масса интересных предметов не всегда понятного назначения. По-

началу казалось, что все они исполнены магического смысла: крышка консервной банки становилась ценным талисманом, а брошенная спичка на всякий случай съедалась (а вдруг волшебная!). Но вскоре появились транспортные самолеты (первая посадочная площадка была подготовлена в 1932 г.), — они приземлялись с ужасающим шумом, распугивая толпы любопытных. Однако эти грохочущие машины оказались добрыми: они «привозили много всякого добра — к примеру, топоры и морские раковины. Груды товаров! У этих людей, должно быть, есть все на свете!»

С тех пор прошло более пятидесяти лет. Многие горцы своими глазами увидели океан. Папуа-Новая Гвинея сделалась независимым государством; в горах теперь выращивают кофе на продажу. Привычными здесь стали колледжи, кинотеатры, пивные заведения и больницы, куда можно обратиться, если тебя ранят стрелой или случится сердечный приступ. Все давно привыкли к грохоту грузовиков на пыльных дорогах. «Большие люди» все так же трудятся, только вот высоко ценившиеся красивые жемчужные раковины, в невероятном изобилии завезенные самолетами, потеряли свою ценность; теперь «большие люди» шеголяют машинами и звонкой монетой.

Вики Пирс, Джон Пирс, Милдред Бухсбаум, Ральф Бухсбаум. СОВРЕМЕННЫЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ LIVING INVERTEBRATES, by Vicki Pearse, John Pearse, Mildred Buchsbaum and Ralph Buchsbaum. Blackwell Scientific Publications, Inc., (\$45)

В ЭТОМ ТОЛСТОМ, богато иллюстрированном новейшем «бестиарии» вы не встретите ни рыб, ни птиц, ни лягушек, ни лис, ни страшных ядовитых змей. Здесь нет ни одного из представителей пяти классов позвоночных (хотя некоторые хордовые и упоминаются); содержание его по воле авторов составляют совсем другие животные — беспозвоночные. Это огромное множество животных, «не имеющих позвоночника», включает 97% современных видов, которых не менее 10 млн. Беспозвоночных группируют в десять основных типов, отражающих 10 планов строения тела; они вмещают в себя подавляющую часть нынеживущих форм. Остальные 20 более мелких типов объединяют не более чем по несколько сотен видов каждый. Книга в очень удобной для чтения форме рассказывает о существах, появившихся в результате долгой искусной деятельно-

сти Природы, во всей полноте так нами и не постигнутой. В конце есть несколько любопытных страниц, где приводится дополнительная литература частью общедоступного, частью специального научного характера, о некоторых группах животных.

Восемьсот страниц книги, снабженные множеством фотографий, рисунков и схем, продуманно разделены на 30 глав, каждая из которых является занимательным очерком естественной истории того или иного типа беспозвоночных животных. Описываются строение, экология и поведение представителей каждого типа; единство материала создается благодаря сравнительному подходу в изложении. И оформлением, и четким компактным текстом книга вызывает радостное ощущение богатого разнообразия живого. Она хороша как для научных работников, так и для широко читателя.

Постараемся на нескольких примерах показать, что же это за бестиарий. Десять страниц посвящены наиболее известному представителю ресничных инфузорий — парамеци-туфельке; даются изображения как животного целиком на фотографиях и рисунках, так и отдельных деталей строения на электронных микрофотографиях. Сложная генетическая структура и поведение этих одноклеточных существ, довольно крупных по сравнению с большинством животных клеток, их жизненный цикл (стадии которого аналогичны этапам жизни высших организмов — созреванию, старению, смерти) — все это приводит к мысли о том, что в отдельной парамеции и в колонии простейших уже есть черты, свойственные многоклеточным животным. Вы встретите скопления ресничных инфузорий, а также скопления жгутиковых амёб, напоминающие настоящих многоклеточных животных.

Взгляните на круглых червей — нематод. По объему этот тип среди беспозвоночных уступает лишь членистоногим. Нематоды, тело которых имеет вид заостренной с обоих концов трубки, отличаются огромной адаптивной способностью, являя удивительное многообразие форм — от свободноживущих до внутренних паразитов животных и растений. «Если бы вдруг все живое, кроме нематод, исчезло с лица Земли... и если бы мы, став бесплотными духами, увидели этот новый мир, взору предстали бы горы и долины, реки, озера и океаны, покрытые сплошной пеленой из нематод. Расположение бывших городов можно было бы узнать по скоплениям определенных видов нематод, занявших место людей. Рядами приви-

дений стояли бы деревья, обозначая улицы и автомагистрали. Можно было бы установить, где обитали разные растения и животные... даже с точностью до вида». (Это цитируется Н. Кобб; к сожалению, в книге нет ссылки на источник.)

Хотя большинство читателей никогда не видели нематод своими глазами, они хорошо знают о существовании трихинелл — паразитических нематод, заражающих свиней и человека. В книге рассказывается о том, что один из символов профессии врача, являющийся эмблемой медицинской службы армии США, — две змеи, обвивающие стержень, — возник в связи с когда-то распространенным способом избавления от паразитической нематоды *Dracunculus*, обычной на Ближнем Востоке. Паразит, примерно 30 см длиной, отчетливо выдавался змеевидным гребнем под кожей ноги или туловища пораженного человека; лечение состояло в том, что следовало осторожно намотать червя на деревянный стержнек, не нарушив его целостности, чтобы не оставить в теле ни малейшего источника инфекции (такая задача явно не для чувствительного новичка).

Читая дальше, мы узнаем о представителе колониальных кишечнополостных — «португальском военном кораблике», о пелагической ярко-лиловой улитке и голубом крабе. Последний носит на спине тяжелую обузу — крупный морской желудь, а в теле его паразитирует другое животное, относящееся к тому же подклассу, что и морской желудь, — корнеголовый рачок. Этот паразит подавляюще влияет на линьку краба, вмешиваясь в гормональную регуляцию роста; ветвящиеся отростки рачка образуют «систему тонких трубочек наподобие корневых растений... которые проникают в кровеносную систему хозяина вплоть до кончиков ног и поглощают питательные вещества». Несколько страниц в книге посвящены многоножкам (хотя их и называют тысячножками, число ног ни у одного из 8 тыс. видов не превышает 752). В тропиках обитает поистине огромный представитель этой группы, достигающий в длину 60 см. Будучи растительноядными, многоножки не кушают животных, но в качестве защитного средства выделяют токсичный секрет, в состав которого входит цианистый водород, и поэтому, замечает автор, «лучше не подносить многоножку слишком близко к глазам».

Предпоследняя глава книги — это краткий очерк эволюции. Основные из описанных в книге типов животных возникли полмиллиарда лет назад, что составляет лишь малый от-

резок на длинном пути эволюции жизни на Земле. Типы многоклеточных животных можно разделить на две группы по характеру начальных этапов эмбриогенеза. Различия нередко заметны уже на стадии третьего деления клеток. Восемь эмбриональных клеток располагаются либо радиально, по 4 клетки друг над другом, либо два слоя клеток повернуты на 45° относительно друг друга, образуя начало спирали. Для каждого вида, входящего в данный тип, характерно только свойственное этому типу начальное эмбриональное развитие, и ни в одном типе нет форм со смешанным характером начального дробления. Радиальное дробление свойственно червям и моллюскам, а спиральное характерно для кораллов, морских звезд и многих других групп, в том числе для хордовых животных, включая человека.

Последняя глава книги весьма необычна — здесь дан систематический обзор окраски животных всех рассмотренных групп. Несколько десятков цветных вклеек с 4—5 фотографиями на каждой являют собой прекрасную галерею иллюстраций, завершающую эту чудесную длинную историю. Окраска может быть обусловлена пигментами, дубильными веществами, интерференцией света в специфических структурах — все это дает почти неограниченные возможности разнообразия цветовой гаммы, и животные бывают самых невероятных расцветок (например, живые омары имеют ярко-голубую или зеленовато-коричневую окраску, а вареные — красную). Небесно-голубой цвет некоторых животных создается мельчайшими гранулами, распределенными в прозрачном слое, другие животные обязаны своей окраской обитающим в них организмам-симбионтам. Быстрое изменение окраски может происходить в результате фотохимической реакции или за счет физического уплощения множества распределенных в коже округлых «мешочков», содержащих пигмент. У стрекозы из группы равнокрылых, носящей название «тасманская красotka», в солнечный день стройное тельце сияет чудесным небесно-голубым цветом, а в холодное утро оно остается черным; темная окраска в данном случае служит для утепления.

Орбиты будущего

ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ вопросов изучения и освоения космоса мировое сообщество создало немало разных организаций: Комитет по исследованию и использованию космического пространства (КОСПАР), Международную астронавтическую федерацию (МАФ), Международный астрономический союз (МАС) и другие.

«Деятельность этих организаций, — говорит директор Института космических исследований АН СССР академик Р. З. Сагдеев, — достаточно авторитетна. Но в последние годы крепло ощущение, что необходимы и какие-то неофициальные формы сотрудничества, которые позволили бы перебросить мост от собственно профессиональной космической деятельности к новому мышлению, столь необходимому сейчас нашей планете».

В этой связи и возникло предложение о созыве международного форума «Сотрудничество в космосе во имя мира на Земле», посвященного 30-й годовщине космической эры человечества, начало которой было положено запуском в СССР первого в мире искусственного спутника Земли. Идея форума принадлежит инициативной группе ученых Венгрии, Голландии, СССР, США, ФРГ, Франции и некоторых других стран.

В работе форума, состоявшегося 2—4 октября 1987 г. в Москве, приняли участие 890 человек из более чем 30 стран мира. Ученые, представляющие разные области современной науки, говорили о том, как сегодня с высоты 30-летнего опыта космических исследований они видят будущее космической науки и техники, космонавтики в целом, какими им представляются космические проекты ближайшего будущего, обсуждали глобальные проблемы, которые стоят перед человечеством и могут быть решены при изучении космоса.

Когда на заключительном пленарном заседании форума председатели «круглых дискуссионных столов» один за другим стали докладывать об обсуждавшихся проблемах, открылась необычайно широкая панорама шторма Вселенной земной наукой.

Одной из важных целей космических исследований останется познание ближайшего окружения Земли, прежде всего ее плазменной оболочки. Наша планета как бы погружена в сверхзвуковой поток плазмы, истека-

ющей от Солнца, — «солнечный ветер». Еще недавно это понятие можно было отнести к области фантастики. Сегодня уже есть разделы науки, которые занимаются уникальными, действительно фантастическими свойствами этого ветра. Плазменные приборы разнесены космическими аппаратами практически по всей Солнечной системе. Многие эксперименты были посвящены изучению взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли. Процессы этого взаимодействия имеют прямое отношение не только к «самочувствию» околоземного пространства, но и к жизни на Земле.

На форуме рассматривались различные проекты исследований в области космической плазмы. Эти проекты по своей организации могут стать прямыми наследниками той широкой международной структуры, которая образовалась в ходе исследований кометы Галлея. Предполагается запустить примерно 10 спутников, каждый из которых станет опорной точкой единой международной измерительной сети. Спутники будут располагаться на высотах от нескольких сотен до полутора миллионов километров. Один из советских космических аппаратов — это будет «Прогноз» в новой модификации — должен быть выведен в так называемую лагранжеву точку Л-2, расположенную на прямой Земля — Солнце там, где притяжение нашей планеты компенсируется притяжением светила. Таким образом, космический аппарат займет равновесное положение в Солнечной системе. Это будет самая дальняя опорная точка измерительной сети. Работая по единой программе, спутники позволят получить трехмерную картину процессов, происходящих в плазменном окружении Земли. Повидимому, удастся также проверить, насколько обосновано предположение о том, что взаимодействия электрических и магнитных полей в плазме подготавливают определенные механизмы, которые затем приводят к циркуляции верхней атмосферы и, возможно, оказывают влияние на формирование погоды на Земле.

Более обстоятельно предполагается заняться и самим Солнцем. Чем ближе подойдут космические зонды к этому небесному телу и чем в более глубокие слои солнечной короны они проникнут, тем больше мы получим данных о процессах, протекающих в его недрах и атмосфере.

Еще одно направление космической науки, которое активно обсуждалось

на форуме, — это внеатмосферная астрономия. Планируемые исследования охватят практически всю шкалу диапазонов электромагнитного излучения от радиоволн до гамма-лучей. При этом наибольшее внимание, по видимому, будет уделяться рентгеновскому диапазону.

Основная задача рентгеновской астрономии заключается в диагностике горячей космической плазмы. Такие исследования позволяют изучать природу и динамику взрывных процессов в различных объектах и исследовать свойства вещества в экстремальных физических условиях, недостижимых в земных лабораториях. Рентгеновское излучение возникает в «котле» атомных и ядерных превращений, идущих при температурах по крайней мере в полмиллиона градусов. Для сравнения можно напомнить, что видимый солнечный свет излучается поверхностью, нагретой всего лишь до пяти с половиной тысяч градусов. Таким образом, в рентгеновском диапазоне можно наблюдать наиболее «жаркие» и «бурные» процессы во Вселенной.

Одним из сенсационных событий последнего времени стал взрыв звезды в соседней нам галактике — Большом Магеллановом Облаке. Образовалась так называемая Сверхновая 1987А, отличающаяся колоссальной светимостью. Вообще говоря, астрономы регистрируют сверхновые каждый год, но все в далеких галактиках. Сверхновую 1987А можно наблюдать невооруженным глазом. Свет от нее идет до Земли всего лишь 150 тыс. лет — в масштабах Вселенной такое расстояние ничтожно. Поэтому можно было надеяться обнаружить гравитационные волны, нейтрино, рентгеновское и гамма-излучение.

Светящаяся оболочка, образовавшаяся при взрыве звезды, сначала была настолько плотной, что «не выпускала» наружу потоки рентгеновского и гамма-излучения, которые теряли свою энергию, как бы «застывая» в ней. Но поскольку оболочка разлетается во все стороны с колоссальной скоростью, она постепенно становится все «прозрачнее». 10 августа 1987 г. Международной обсерваторией «Рентген», установленной на борту модуля «Квант», пристыкованного к орбитальной станции «Мир», было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение от Сверхновой 1987А. Через 5 дней это излучение уловил и японский спутник «Гинго» («Млечный Путь»). В рамках Московского международного форума прошел специальный семинар, посвященный рассмотрению полученных результатов.

«Пока не ясно, что рождает это излучение, — отметил научный руководитель работ с советской стороны член-корр. АН СССР Р. А. Сюняев. — То ли это пульсар — плотная вращающаяся звезда, которая образовалась после взрыва, то ли это излучение, которое рождается при образовании железа в сброшенной оболочке звезды». Расчеты показывают, что при взрыве звезды должно выбрасываться большое количество радиоактивного кобальта-56. За 114 суток он распадается, давая при этом много гамма-квантов, и превращается в обычное железо-56.

Наблюдения с борта «Кванта» позволят проверить, насколько правильно предположение о том, что тяжелые элементы во Вселенной образуются во время вспышек сверхновых, а затем идет формирование планетных систем и закладываются будущие «месторождения полезных ископаемых».

Сейчас энергия фотонов, которые образуются при распаде кобальта-56, уменьшается примерно в 100 раз при прохождении фотонов сквозь оболочку сверхновой, и мы наблюдаем их в рентгеновском диапазоне. По мере расширения оболочки потери энергии снизятся, и можно будет увидеть первичные линии излучения кобальта-56. По оценкам, его масса в сбросе равна примерно 7,5% массы Солнца. Может, однако, случиться и так, что оболочка Сверхновой 1987А станет прозрачной слишком поздно, когда весь кобальт распадется.

В создании космической обсерватории «Рентген» помимо советских ученых принимали участие их коллеги из Англии, Голландии, ФРГ и Европейского космического агентства (ЕКА). Еще один проект орбитальной обсерватории — «Гранат» осуществляется совместными усилиями советских и французских ученых. Обсерватория задумана как комплекс приборов для проведения детальных исследований в широчайшем диапазоне — от 3 до 2000 кэВ. Американская спутниковая обсерватория «Эйнштейн», которая доставила ученым массу «свежих новостей», зачастую совершенно неожиданных, могла работать лишь в «мягком» диапазоне энергий — от 0,1 до 3 кэВ.

На форуме обсуждался также проект рентгеновской обсерватории нового поколения «Спектр—Рентген—Гамма». По общему мнению, реализация этого проекта позволит сделать значительный шаг вперед в понимании физических свойств различных классов астрономических объектов, объяснении многих, пока не до конца понятных явлений, наблюдаемых во

Вселенной. Среди них — вырожденные звезды в тесных двойных системах, магнитосферы пульсаров, внутренние области ядер галактик, остатки сверхновых, источники гамма-всплесков. Использование в составе внеатмосферной обсерватории телескопов нового поколения, обладающих беспрецедентной чувствительностью и обеспечивающих построение изображений наблюдаемых объектов в рентгеновском диапазоне, а также методов высококачественной спектроскопии будет способствовать достижению этих целей.

Проект «Спектр—Гамма—Рентген» намечено осуществить за пять лет до реализации подобных исследований Европейским космическим агентством и американским Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (НАСА). Результаты проекта станут крупнейшим вкладом в современную науку и будут способствовать разработке новых больших рентгеновских обсерваторий, запуск которых планируется осуществить до конца этого столетия.

Предусматривается также создание наземно-космической радиосистемы, которая по своей эффективности будет эквивалентна гигантскому радиотелескопу с диаметром антенны около 100 тыс. км. Радиосистема — ее называют интерферометром — будет состоять из космической антенны, вынесенной на сильно вытянутую эллиптическую орбиту, и сети крупнейших в мире наземных радиотелескопов; система образует гигантское синтетическое радиозеркало. Чем больше расстояние между антеннами, тем выше угловое разрешение всей системы, т. е. ее «острота зрения» — способность различать на гигантских расстояниях расположенные недалеко друг от друга объекты, излучающие радиоволны.

Безусловно, будут продолжаться и планетные исследования. На ближайшие годы и вплоть до конца столетия они остаются одним из основных направлений деятельности в космосе. В этой области наметилась существенная переориентация главных целей. Основные усилия преимущественно концентрируются на изучении планеты Марс. Советским Союзом предложена широкая поэтапная программа, конечной целью которой станет доставка на Землю до 2000 г. марсианского грунта.

На первом этапе предусматривается вывод космического аппарата на орбиту спутника Марс, создание аэростатной дрейфующей станции в атмосфере планеты, доставка на ее поверхность малого «марсохода»,

оборудованного системой заглубления датчиков, а также использование пенетраторов — специальных устройств для анализа физико-механических свойств грунта и сейсмических исследований. Аэростат, «марсоход» и пенетраторы — существенно новые элементы планетных исследований, которые будут отличать советскую экспедицию от запланированной в США на 1992 г. запуска аппарата «Марс-Обсервер».

Доставка марсианского грунта на Землю представляется наиболее сложным элементом предложенной советскими учеными программы исследований Марса. Прорабатываются различные варианты. Во всех случаях должен обеспечиваться «карантин» возвращаемого аппарата, чтобы исключить заражение нашей планеты внеземными организмами, как бы ни мала была такая вероятность. Анализ марсианского грунта в лучших земных лабораториях с помощью высокочувствительной аппаратуры позволит, по-видимому, сделать однозначный вывод о существовании жизни на Марсе (сейчас или в прошлом). Опыт американских «Викингов» показал, что с помощью автоматов, несмотря на все их совершенство, провести такие исследования непосредственно на Марсе чрезвычайно трудно. И еще один аспект: осуществление доставки марсианского грунта станет моделью последующего, уже пилотируемого рейса по маршруту Земля — Марс — Земля.

Очень много говорилось на форуме о полете человека на Марс. Около 50 человек из немногим более 200, побывавших в космосе, приняли участие в дискуссии. Обсуждения показывают, что для организации пилотируемой экспедиции на Марс не существует каких-то совершенно непреодолимых технических трудностей. Проект такого полета представляется на нынешнем этапе развития космической техники не более сложным, чем в свое время экспедиция на Луну по сравнению с первым полетом человека в космос. Другое дело, способен ли сам человек к столь длительному пребыванию в космосе: полет на Марс продлится примерно 2,5 года?

«Объем наших знаний, — отметил директор Института медико-биологических проблем академик О. Г. Газенко, — позволяет обеспечить в настоящее время полет человека в космическом пространстве на приемлемом уровне риска. Но вместе с тем важно подчеркнуть, что мы еще не все знаем о реакции человеческого организма на воздействие факторов космического пространства и космического полета. В длительных полетах

мышцы космонавта теряют массу. Костная ткань тоже подвержена изменениям, связанным с потерей солей кальция. Опасно ли это? Пока нет. Но, думаю, с возрастанием длительности космических полетов потери эти могут повлиять на прочность скелета.

Когда человек долго находится на орбите, у него снижается сопротивляемость организма инфекциям. Раз проблема существует, мы должны исследовать ее настолько, чтобы в принципе исключить опасность заболевания.

Далее — обеспечение радиационной безопасности экипажа. Нынешние полеты осуществляются по трассам, расположенным ниже радиационных поясов Земли, и не представляют очевидной опасности для космонавтов. Но, думая о будущих межпланетных сообщениях, нужно представлять себе, как действуют на живой организм тяжелые частицы космического излучения. В этом направлении проводятся биологические опыты на космических аппаратах, летающих за пределы магнитосферы планеты.

В дальних космических полетах будут участвовать большие группы космонавтов. В связи с этим остро встает проблема психологической совместности.

Наконец, длительность полета существенно зависит от решения проблем жизнеобеспечения. В конечном счете речь должна идти о создании на борту космических кораблей автономных экологических систем, способных к относительно длительному существованию на основе замкнутого круговорота веществ с собственными механизмами саморегулирования и самоуправления, как это происходит в биосфере Земли.

Я с большим оптимизмом и надеждой отношусь к идее полета человека на Марс, — подчеркнул академик О. Г. Газенко, — и надеюсь, что люди сумеют это сделать. Тем не менее, несмотря на то что мы достигли серьезных успехов в освоении космического пространства, объем наших знаний недостаточен для того, чтобы дать научно обоснованный ответ на вопрос, может ли человек полететь на Марс».

Однако вскоре будет преодолен 300-суточный рубеж пребывания человека в космосе. В целом складывается впечатление, что человек может удовлетворительно адаптироваться к длительному воздействию невесомости, а по окончании продолжительных полетов — к земной гравитации и успешно возвращаться к нормальной жизни на Земле. В дальнейшем весьма вероятно использова-

ние в качестве средств профилактики в полете искусственной силы тяжести, о чем еще в начале века писал К. Э. Циолковский.

Введение в эксплуатацию новых мощных ракет-носителей позволяет говорить о возможности создания на борту пилотируемого межпланетного корабля достаточно эффективной радиационной защиты.

Словом, неразрешимых проблем не видно. Учитывая, однако, что речь идет о человеке, о его здоровье и безопасности, каждый новый шаг в космос должен скрупулезно взвешиваться, опираться на самое тщательное и детальное изучение и вновь получаемых данных, и всего предыдущего опыта. Ничто не должно выпасть из поля зрения, включая отдаленные последствия космических полетов. Науке, в том числе космической биологии и медицине, придется накопить еще немало фактов о человеке и космосе, понять механизмы их непрямого взаимодействия, помочь достичь гармонии их взаимоотношений.

Фундаментальные исследования всегда были на переднем крае освоения космоса. Вместе с тем космическая наука с каждым годом будет давать все больше практических результатов. Это — дальнейшее развитие телекоммуникаций, метеорологической сети, мониторинга земной поверхности.

Человечество наконец-то осознало, что оно не имеет права рассматривать окружающую среду как нечто внешнее, о чем можно не проявлять заботы. Хотим мы этого или нет, но деятельность человека на Земле, особенно интенсивное развитие промышленности, уже вызвала обострение глобальных экологических проблем, таких, в частности, как «эрозия» земного климата. Речь идет о нарушении обменных процессов между поверхностью планеты, океанами и атмосферой — процессов, которые формировались на протяжении сотен миллионов лет в ходе эволюции планеты и ее биосферы.

Космическая техника могла бы обеспечить очень чувствительный контроль за всеми этими процессами. Такой контроль даст достоверный прогноз того, что ожидает Землю, ее атмосферу, климат в будущем, и позволит выработать меры для сохранения условий нормальной жизни на планете. Все эти вопросы активно обсуждались на форуме.

Большую актуальность приобретает и тема «коммерческого космоса». Советский Союз в последние годы предложил всем заинтересованным государствам ряд услуг, которые можно было бы осуществлять на ши-

рокой международной основе: вывоз спутников, принадлежавших другим странам, с помощью советских ракет; предоставление технологического оборудования на спутниках и орбитальных станциях для изготовления различных материалов и лекарств; фотографирование территорий стран по их заявкам. Эти вопросы также рассматривались на форуме, и их обсуждение показало, что у «коммерческого космоса» большие перспективы.

О чем бы ни заходила речь на международной встрече — о запуске новых астрономических обсерваторий, о полете автоматических аппаратов к другим планетам, об организации пилотируемых экспедиций на Марс, — постоянно подчеркивалась необходимость объединить усилия ученых разных стран. Без этого сегодня немыслимо дальнейшее эффективное освоение космоса.

Одним из конкретных проявлений космического сотрудничества, как было указано в заявлении участников форума, могло бы стать проведение в 1992 г. Международного года космоса. Он включал бы скоординированную деятельность в области космонавтики в 1992 г. и согласованное планирование будущих проектов, выходящих за пределы нашего века. Международный год космоса охватывал бы совместную деятельность по контролю глобальных изменений земной среды, изучению планет, Луны, геиосферы, исследованиям в области астрофизики, радиоастрономии, солнечной физики, индустриализации космоса и использованию космической техники для целей образования и медицины.

Международное сотрудничество в освоении космоса становится одним из самых значительных факторов в объединении всего человечества.

*Юрий Зайцев,
Институт космических
исследований АН СССР*

СЛЕДУЮЩАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

LOGIC FOR PROBLEM SOLVING. R. Kowalski. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1979.

SMALLTALK-80: THE LANGUAGE AND ITS IMPLEMENTATION. Adele Goldberg and David Robson. Addison-Wesley Publishing Co., 1983.

NO SILVER BULLET: ESSENCE AND ACCIDENTS OF SOFTWARE ENGINEERING. Frederick P. Brooks, Jr., in *Computer*, Vol. 20, No. 4, pages 10-19; April, 1987.

КОУЛ Б. К. НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ КРИСТАЛЛА, СОДЕРЖАЩЕГО МИЛЛИАРД ТРАНЗИСТОРОВ. — *Электроника*, 1987, т. 60, № 7.

АРХИТЕКТУРА КОМПЬЮТЕРОВ

INTERCONNECTION NETWORKS FOR SIMD MACHINES. Howard Jay Sussman in *Computer*, Vol. 12, No. 6, pages 57-65; June, 1979.

A SURVEY OF HIGHLY PARALLEL COMPUTING. Leonard S. Haynes, Richard L. Lau, Daniel P. Siewiorek and David W. Mizell in *Computer*, Vol. 15, No. 1, pages 9-24; January, 1982.

CONCURRENT VLSI ARCHITECTURES. Charles L. Seitz in *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-33, No. 12, pages 1247-1265; December, 1984.

A SURVEY OF PROPOSED ARCHITECTURES FOR THE EXECUTION OF FUNCTIONAL LANGUAGES. Steven R. Vegdahl in *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-33, No. 12, pages 1050-1071; December, 1984.

EXPERIMENTAL PARALLEL COMPUTING ARCHITECTURES. Edited by Jack C. Dongarra. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1987.

PROCEEDINGS OF THE THIRD CONFERENCE ON MULTIPROCESSORS AND ARRAY PROCESSORS. Edited by Walter J. Karplus. The Society for Computer Simulation, 1987.

ГОЛОВКИН Б. А. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. — М.: Наука, 1980.

ХОКНИ Р., ДЕССХОУП К. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЭВМ. АРХИТЕКТУРА, ПРОГРАММИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМЫ. — М.: Радио и связь, 1986.

МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРОВ

THE EVOLUTION OF DIGITAL ELECTRONICS TOWARDS VLSI. Robert W. Keyes in *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 4, pages 271-279; April, 1979.

ULTRA-LARGE SCALE INTEGRATION. James D. Meindi in *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-31, No. 11, pages 1555-1561; November, 1984.

ШАРЛЬ Г. БЕННЕ, РОЛЬФ ЛАНДАУЭР. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ. «В мире науки», 1985, № 9.

СОВРЕМЕННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

THE COSMIC CUBE. Charles L. Seitz in *Communications of the ACM*, Vol. 28, No. 1, pages 22-33; January, 1985.

DOMESTICATING PARALLELISM. David Gelernter in *Computer*, Vol. 19, No. 8, pages 12-19; August, 1986.

PARA-FUNCTIONAL PROGRAMMING. Paul Hudak in *Computer*, Vol. 19, No. 8, pages 60-71; August, 1986.

ADVANCED COMPILER OPTIMIZATIONS FOR SUPERCOMPUTERS. David A. Padua and Michael J. Wolfe in *Communications of the ACM*, Vol. 29, No. 12, pages 1184-1201; December, 1986.

DATA PARALLEL ALGORITHMS. W. Daniel Hillis and Guy L. Steele, Jr., in *Communications of the ACM*, Vol. 29, No. 12, pages 1170-1183; December, 1986.

PARALLELISM, PERSISTENCE AND META-CLEANLINESS IN THE SYMMETRIC LISP INTERPRETER. David Gelernter, Suresh Jaganathan and Thomas London in *Proceedings of the SIGPLAN'87 Symposium on Interpreters and Interpretive Techniques*. ACM Press, 1987.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ. Под ред. Г. И. Марчука. Вып. 2. — М.: Наука, 1985.

ТЕХНОЛОГИЯ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

DISK-STORAGE TECHNOLOGY. Robert M. White in *Scientific American*, Vol. 243, No. 2, pages 138-148; August, 1980.

PERPENDICULAR MAGNETIC RECORDING-EVOLUTION AND FUTURE. Shunichi Iwasaki in *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-20, No. 5, pages 657-662; September, 1984.

MAGNETO-OPTIC RECORDING TECHNOLOGY. Mark H. Kryder in *Journal of Applied Physics*, Vol. 57, No. 8, Part II, pages 3913-3918; April 15, 1985.

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

DIRECT MANIPULATION: A STEP BEYOND PROGRAMMING LANGUAGES. Ben Shneiderman in *Computer*, Vol. 16,

No. 8, pages 57-69; August, 1983.

THE HUMAN INTERFACE: WHERE PEOPLE AND COMPUTERS MEET. Richard A. Bolt. Lifetime Learning Publications, 1984.

DIRECT MANIPULATION INTERFACES. E. Hutchins, J. Hollan and D. Norman in *User Centered System Design*, edited by Donald A. Norman and Stephen Draper. Lawrence Erlbaum & Associates, 1986.

ФОЛИ ДЖ., ВЭН ДЭМ А. ОСНОВЫ ИНТЕРАКТИВНОЙ МАШИННОЙ ГРАФИКИ. — М.: Мир, 1985.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

COMPUTER NETWORK DEVELOPMENT TO ACHIEVE RESOURCE SHARING. L. G. Roberts and B. D. Wessler in *Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference*. American Federation of Information Processing Societies, 1970.

A PROTOCOL FOR PACKET NETWORK INTERCOMMUNICATION. Vinton G. Cerf and Robert E. Kahn in *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-22, No. 5, pages 637-648; May, 1974.

SPECIAL ISSUE ON PACKET COMMUNICATION NETWORKS. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 11; November, 1978.

EVOLUTION OF THE ETHERNET LOCAL COMPUTER NETWORK. John F. Shoch, Yogen K. Dalal, David D. Redell and Ronald C. Crane in *Computer*, Vol. 15, No. 8, pages 10-27; August, 1982.

INTEGRATED SERVICES DIGITAL NETWORK. *AT&T Technical Journal*, Vol. 65, No. 1; January-February, 1986.

МАРТИН ДЖ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ И РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, МЕТОДЫ И АРХИТЕКТУРА. — М.: Финансы и статистика, 1985.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

GALACTIC BRIDGES AND TAILS. Alar Toomre and Juri Toomre in *The Astrophysical Journal*, Vol. 178, No. 3, Part 1, pages 623-666; December 15, 1972.

INTRODUCTION TO VLSI SYSTEMS. Carver Mead and Lynn Conway. Addison-Wesley Publishing Co., 1980.

THE PHYSICAL UNIVERSE: AN INTRODUCTION TO ASTRONOMY. Frank H. Shu. University Science Books, 1982.

BINARY FORMATION AND INTERACTIONS WITH FIELD STARS. Piet Hut in *Dynamics of Star Clusters: Proceedings of the 113th Symposium of the International Astronomical Union*, edited by

Издательство
МИР
предлагает:

Уоттенберг Ф.
**ПРОГРАММИРОВАНИЕ
ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО
КОМПЬЮТЕРА ЭПЛ**

Перевод с английского
Книга американского ученого представляет собой пособие для изучающих основы информатики и вычислительной техники и осваивающих методы составления и отладки рабочих программ в диалоговом режиме на персональном компьютере, в котором используется язык Бейсик. Приводятся 29 алгоритмов решения математических и физических задач, для которых составлены рабочие программы на языке Бейсик.

Для пользователей персональных ЭВМ, в том числе для школьников старших классов и специалистов со средним и высшим образованием.

1988, Цена 1 р. 60 к.

Дао Л.
**ПРОГРАММИРОВАНИЕ
МИКРОПРОЦЕССОРА
8088**

Перевод с английского
Книга является простым и доступным для широкого круга пользователей справочным руководством по программированию на языке ассемблера микропроцессора 8088. В качестве примеров приводятся 20 программ, реализующих алгоритмы типовых задач сбора и обработки данных. Описывается архитектура микропроцессора с использованием 32-разрядных регистров, позволяющих создавать микро-ЭВМ с большими вычислительными возможностями.

Для программистов и специалистов, использующих вычислительную технику и желающих ознакомиться с программированием микро-ЭВМ.

1988, 19 л. Цена 1 р. 70 к.



Jeremy Goodman and Piet Hut. D. Reidel Publishing Co., 1985.

A DIGITAL ORRERY. James H. Applegate, Michael R. Douglas, Yetka Gürsel, Gerald J. Sussman and Jack Wisdom in *The Astronomical Journal*, Vol. 92, No. 1, p. 176; July, 1986.

Марочник Л. С., Сучков А. А. ГАЛАКТИКА. — М.: Наука, 1984.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ МЕДИЦИНЫ**

READINGS IN MEDICAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE: THE FIRST DECADE. Edited by W. J. Clancey and E. H. Shortliffe. Addison-Wesley Publishing Co., 1984.

COMPUTER-ASSISTED MEDICAL DECISION MAKING. Edited by J. A. Reggia and S. Tuhim. Springer-Verlag, 1985.

A COMPUTATIONAL MODEL OF REASONING FROM THE CLINICAL LITERATURE. Glenn D. Rennels. Springer-Verlag, 1985.

SPECIAL ISSUE ON MEDICAL INFORMATICS. *The Western Journal of Medicine*, Vol. 145, No. 6; June, 1986.

A COMPUTER DATA BASE FOR INFORMATION ON CANCER TREATMENT. Susan Molloy Hubbard, Jane E. Henney and Vincent T. DeVita in *The New England Journal of Medicine*, Vol. 316, No. 6, pages 315-318; February 5, 1987.

COMPUTER PROGRAMS TO SUPPORT CLINICAL DECISION MAKING. Edward H. Shortliffe in *The Journal of the American Medical Association*, Vol. 258, No. 1, pages 61-66; July 3, 1987.

Брукинг А., Джонс П., Кокс Ф. и др. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПРИМЕРЫ. Перев. с англ. — М.: Радио и связь, 1987. (Кибернетика).

Хейес-Рот Р., Уотерман Д., Ленат Д. ПОСТРОЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ. Перев. с англ. — М.: Мир, 1987.

Алексеева Е. Ф., Стефанюк В. Л. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ — СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ. Известия АН СССР. Серия Техническая кибернетика. — 1984, № 5, с. 153-167.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВА**

IMPACT OF COMPUTATIONAL METHODS ON AIRCRAFT DESIGN. P. E. Rubbert and E. N. Tinoco. AIAA Atmosphere Flight Conference, 1983.

HIGH-SPEED COMPUTATION. Edited by Janusz S. Kowalik. Springer-Verlag, 1984.

VECTOR AND PARALLEL PROCESSORS IN COMPUTATIONAL SCIENCE. Edited by I. S. Duff and J. K. Reid. Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1985.

DIRECT METHODS FOR SPACE

MATRICES. I. S. Duff, A. M. Erisman and J. K. Reid. Oxford University Press, 1986.

НАУКА ВОКРУГ НАС

SIMPLE SOLUTIONS TO RUBIK'S MAGIC. James G. Nourse. Bantam Books, 1986.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

FIGHTS, GAMES, AND DEBATES. Anatol Rapoport. University of Michigan Press, 1960.

THE EVOLUTION OF COOPERATION. Robert Axelrod. Basic Books, 1984.

Издательство
МИР
предлагает:

Д. Ши
**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В
ЗАДАЧАХ ТЕПЛООБМЕНА**

Перевод с английского
В книге представлены обзор и описание наиболее эффективных применяемых в вычислительной практике подходов и методов расчета, рассмотрено приложение этих методов к исследованию наиболее важных процессов теплообмена: теплопроводности, конвекции и излучения. Рассмотрены физические основы и методы решения сложных комплексных задач, связанных с турбулентностью и горением.

Для специалистов, аспирантов и студентов в различных областях теплофизики, вычислительной и прикладной математики, а также для инженерно-технических работников в области авиационной и ракетно-космической техники, энергомашиностроения, химической технологии.

1987, 20 л. Цена 2 р. 80 к.



Перечень статей, опубликованных в журнале «В мире науки» в 1987 г.

ЯНВАРЬ

Ричард П. Лэзер, Уильям И. Маклафлин, Донна М. Вулф ИНЖЕНЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВСТРЕЧИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ВОЯДЖЕР-2» С ПЛАНЕТОЙ УРАН, с. 4.
Уильям Е. Картер, Дуглас С. Робертсон ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ, с. 16.
Томас Р. Чек РНК — ФЕРМЕНТ, с. 26.
Мартинус Дж. Г. Вельтман БОЗОН ХИГГСА, с. 38.
В. С. Летохов ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТОМАХ И МОЛЕКУЛАХ, с. 46.
Джозеф Т. Истмэн, Артур Л. Де Фриз АНТАРКТИЧЕСКИЕ РЫБЫ, с. 58.
Энн Трейсман ОБЪЕКТЫ И ИХ СВОЙСТВА В ЗРИТЕЛЬНОМ ВОСПРИЯТИИ ЧЕЛОВЕКА, с. 68.
Лоуренс С. Лернер, Эдвард А. Госселин ГАЛИЛЕЙ И ПРИЗРАК ДЖОРДАНО БРУНО, с. 80.
Джирл Уолкер ГИПЕРСКОП И ПСЕВДОСКОП ПОЗВОЛЯЮТ ИССЛЕДОВАТЬ, КАК ЧЕЛОВЕК ВОСПРИНИМАЕТ ГЛУБИНУ ПРОСТРАНСТВА, с. 90.
А. К. Дьюдни ИГРА «ЗВЕЗДНЫЙ БОЙ» ДЛЯ ДОМАШНИХ КОМПЬЮТЕРОВ, с. 96.

ФЕВРАЛЬ

Дональд У. Лайт БОЛЬНИЧНЫЕ КОРПОРАЦИИ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ США, с. 6.
Джеймс П. Кратчфилд, Дж. Дойн Фармер, Норман Х. Паккард, Роберт С. Шоу ХАОС, с. 16.
Лоуренс М. Краус НЕВИДИМОЕ ВЕЩЕСТВО ВО ВСЕЛЕННОЙ, с. 30.
Роберт К. Галло ПЕРВЫЙ РЕТРОВИРУС ЧЕЛОВЕКА, с. 44.
Ричард Г. Масланд ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТЧАТКИ, с. 58.
Майкл Л. Эванс, Рэнди Мур, Карл-Хайнц Хазенстайн КАК КОРНИ РАСТЕНИЙ РЕАГИРУЮТ НА СИЛУ ТЯЖЕСТИ, с. 70.
Алек Н. Брукс, Аллан В. Абботт, Дейвид Гордон Уилсон АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ПО ВОДЕ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МУСКУЛЬНУЮ СИЛУ ЧЕЛОВЕКА, с. 78.
Дональд Дж. Уотс, Кэрол Мартин Уотс ДРЕВНЕРИМСКИЙ ЖИЛОЙ КОМПЛЕКС, с. 88.
Джирл Уолкер КАК ПРОЙТИ ЧЕРЕЗ ЛАБИРИНТ НЕ ЗАБЛУДИВШИСЬ, с. 96.
А. К. Дьюдни О ФРАКТАЛЬНЫХ ГОРАХ, ГРАФТАЛЬНЫХ РАСТЕНИЯХ И ДРУГИХ ГРАФИЧЕСКИХ ЧУДЕСАХ ФИРМЫ РИХАР, с. 104.

МАРТ

Линн Р. Сайкс, Дэн М. Дэвис О МОЩНОСТИ СОВЕТСКИХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВООРУЖЕНИЙ, с. 4.
Эндрю П. Ингерсолл ПЛАНЕТА УРАН, с. 16.
Роберт К. Галло ВИРУС СИНДРОМА ПРИОБРЕТЕННОГО ИММУННОГО ДЕФИЦИТА, с. 26.
Джеймс Л. Гулд, Питер Марлер НАУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ИНСТИНКТА, с. 38.
Терри Р. Пенни, Десикан Бхаратхан ЭНЕРГИЯ, ИЗВЛЕКАЕМАЯ ИЗ ОКЕАНА, с. 54.
Леонард М. Сандер ФРАКТАЛЬНЫЙ РОСТ, с. 62.
Марк Дж. Остро ЛИПОСОМЫ, с. 70.
Майкл Л. Райдер ЭВОЛЮЦИЯ РУНА, с. 80.
Джирл Уолкер НЕКОТОРЫЕ ЛЮБОПЫТНЫЕ СВОЙСТВА ОТРАЖЕНИЙ В ВОДЕ, с. 90.
А. К. Дьюдни АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕРВОГО ТУРНИРА ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ ИГРЕ «БОЙ В ПАМЯТИ», с. 9.

АПРЕЛЬ

Дж. Ларри Браун ГОЛОД В США, с. 4.
Роберт Дей Аллен МИКРОТРУБОЧКА — ВНУТРИКЛЕТОЧНЫЙ МОТОР, с. 12.
Якоб Шейхем САМЫЕ СТАРЫЕ ПУЛЬСАРЫ, с. 22.
Франклин У. Сталь ГЕНЕТИЧЕСКАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ, с. 30.
Мордехай Хайблум, Лестер Ф. Истмен БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ, с. 44.
К. Ханс Нельсон, Кирк Р. Джонсон КИТЫ И МОРЖИ — ПАХАРИ МОРСКОГО ДНА, с. 56.
Джонатан Р. Коул, Гарриет Цукерман ЖЕНЩИНЫ В НАУКЕ, с. 64.
М. В. Мэттьюз, Дж. Р. Пирс КОМПЬЮТЕР В РОЛИ МУЗЫКАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА, с. 72.
Джирл Уолкер СЕКРЕТ БЫСТРОГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ В МИКРОВОЛНОВОЙ ПЕЧИ, с. 82.
А. К. Дьюдни ТРЕХМЕРНЫЕ ВЕРСИИ ИГРЫ «ЖИЗНЬ», с. 88.

МАЙ

Фрэнк Р. Веллютино ДИСЛЕКСИЯ, с. 4.
Джеймс М. Хогл, Мэри Чау, Дэвид Дж. Филмэн СТРУКТУРА ВИРУСА ПОЛИОМИЕЛИТА, с. 14.
Уильям Д. Филлипс, Гарольд Дж. Меткалф ОХЛАЖДЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ АТОМОВ, с. 24.

Дж. Ф. Пауэр, Р. Ф. Фоллет МОНОКУЛЬТУРНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, с. 32.

Ясер С. Абу-Мостафа, Деметр Псалтис ОПТИЧЕСКИЕ НЕЙРОННО-СЕТВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ, с. 42.

Энрико Бонатти КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ РИФТОГЕНЕЗ, с. 52.

Бернд Хайнрих ТЕРМОРЕГУЛЯЦИЯ У ЗИМНИХ СОВОК, с. 62.

Т. Даглас Прайс, Эрик Бринг Петерсен МЕЗОЛИТИЧЕСКИЙ ЛАГЕРЬ НА ТЕРРИТОРИИ ДАНИИ, с. 72.

Джирл Уолкер КАК ОПРЕДЕЛИТЬ РАССТОЯНИЕ ДО СОЛНЦА, НАБЛЮДАЯ ЗА СЛЕДОМ МЕТЕОРА, с. 82.

А. К. Дьюдни МАШИНКИ БРАЙТЕНБЕРГА — АВТОМАТЫ С СИНТЕТИЧЕСКОЙ ПСИХОЛОГИЕЙ, с. 88.

ИЮНЬ

Теодор Б. Тэйлор ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ, с. 4.

Джули Л. Шнапф, Денис А. Бэйлор КАК ФОТОРЕЦЕПТОРНЫЕ КЛЕТКИ РЕАГИРУЮТ НА СВЕТ, с. 16.

Торренс В. Джонсон, Роберт Х. Браун, Лоуренс А. Содерблом СПУТНИКИ УРАНА, с. 27.

Мартин С. Хирш, Джоан К. Каплан ЛЕЧЕНИЕ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ, с. 40.

Йосихиро Хамакава ФОТОЭНЕРГЕТИКА, с. 52.

Марк Э. С. Макменагин ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ ЖИВОТНЫХ, с. 60.

Синьян Шень АКУСТИКА ДРЕВНИХ КИТАЙСКИХ КОЛОКОЛОВ, с. 70.

Николас Тот ПЕРВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, с. 80.

Джирл Уолкер КАК ИЗГОТОВИТЬ БАРОМЕТР, В КОТОРОМ ВМЕСТО РТУТИ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ВОДА, с. 92.

А. К. Дьюдни ПРОГРАММИРОВАНИЕ МЕЛОДИЧНОГО ЗВУЧАНИЯ РАБОТАЮЩЕГО КОМПЬЮТЕРА, с. 98.

ИЮЛЬ

Лестер К. Тёроу РОСТ НЕРАВЕНСТВА, с. 4.

Виктор Е. Виола, Грант Дж. Матьюз КОСМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЛИТИЯ, БЕРИЛИЯ И БОРА, с. 14.

Томазо Поджио, Кристоф Кох СИНАПСЫ, РАСПОЗНАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЕ, с. 24.

Стивен Г. Шнайдер МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА, с. 32.

Энтони Серами, Элен Влассара, Майкл Браунли ГЛЮКОЗА И СТАРЕНИЕ, с. 42.

Джеймс С. Уолкер, Честер А. Вос ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ФАЗЫ, с. 50.
Уильям С. Дейвис ДЕТОНАЦИЯ ВЗРЫВАЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, с. 60.

Джеймс Дж. Чилдресс, Хорст Фел-

бек, Джордж Н. Сомеро СИМБИОЗ В ГЛУБИНАХ ОКЕАНА, с. 72.

Джирл Уолкер ИСЧЕЗНОВЕНИЯ, ЗАСТАВЛЯЮЩИЕ ВСПОМНИТЬ ЧЕШИРСКОГО КОТА, с. 80.

А.К. Дьюдни ПРОГРАММЫ ДЛЯ «БЫКОВ» И «МЕДВЕДЕЙ», ИГРАЮЩИХ НА БИРЖЕ, с. 86.

АВГУСТ

Майкл Х. Гланц ЗАСУХА В АФРИКЕ, с. 4.

Дуглас К. Юван, Барри Л. Маррс МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОТОСИНТЕЗА, с. 12.

Эндрю Д. Джеффрис, Питер Р. Соулсон, Роберт Е. Сперо, Майкл Э. Цукер ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ, с. 20.

Мортимер Мишкин, Тим Эппенцеллер АНАТОМИЯ ПАМЯТИ, с. 30.

Питер Френсис, Стивен Селф ОБРУШЕНИЕ ВУЛКАНОВ, с. 42.

Уоррен М. Запол КАК ТЮЛЕНЬ УЭДДЕЛЛА ПРИСПОСОБЛЕН К НЫРЯНИЮ, с. 52.

У. Дэниел Хиллис КОММУТАЦИОННАЯ МАШИНА, с. 60.

Бартон Дж. Бернштейн РОЖДЕНИЕ ПРОГРАММЫ РАЗРАБОТКИ БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ В США, с. 70.

Джирл Уолкер ГОЛОВОЛОМКИ В ДВУХ И ТРЕХ ИЗМЕРЕНИЯХ И МЕТОДЫ, ОБЛЕГЧАЮЩИЕ ИХ РЕШЕНИЕ, с. 78.

А.К. Дьюдни АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ГОЛОВОЛОМКИ, с. 84.

СЕНТЯБРЬ

Джулиан Секели ПЕРЕДОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И КРИЗИС СТАЛЕЛИТЕЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ США, с. 6.

Люберт Страйер МОЛЕКУЛЫЗРИТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ, с. 16.

Джеффри Н. Кузи, Ларри У. Эспозито КОЛЬЦА УРАНА, с. 26.

Роберт Долан, Гарри Линз ПЛЯЖИ И БАРЬЕРНЫЕ ОСТРОВА, с. 34.

Гэйл С. Хабичт, Грегори Бек, Джордж Л. Бенач БОЛЕЗНЬ ЛАЙМА, с. 44.

Ян Рафельский, Стивен Е. Джоунс ХОЛОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ, с. 52.

Карл Дж. Никлас АЭРОДИНАМИКА ОПЫЛЕНИЯ ВЕТРОМ, с. 60.

Гус В. Ванбик АРКИ И СВОДЫ В ДРЕВНЕЙ АРХИТЕКТУРЕ БЛИЖНЕГО ВОСТОКА, с. 68.

Франк фон Хиппель, Дэвид Х. Олбрайт, Барбара Г. Леви О ПРЕКРАЩЕНИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ, с. 78.

Джирл Уолкер ПОЧЕМУ ЖИДКОСТЬ ТЕЧЕТ ПО ТРУБКЕ БЫСТРЕЕ, КОГДА ТРУБКА СУЖЕНА, с. 88.

А.К. Дьюдни СТРАННАЯ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТЬ ХАОСА, с. 96.

ОКТАБРЬ

Джон С. Летчер-младший, Джон К. Маршалл, Джеймс К. Оливер III, Нильс Сальвесен ЯХТА «СТАР3-ЭНД-СТРАЙПС», с. 4.

Алан Д. Криш СТОЛКНОВЕНИЯ ВРАШАЮЩИХСЯ ПРОТОНОВ, с. 12.

Дэвид Пэттерсон ПРИЧИНЫ СИНДРОМА ДАУНА, с. 22.

Гордон Л. Ада, Густав Носсал КЛОНАЛЬНО-СЕЛЕКЦИОННАЯ ТЕОРИЯ, с. 30.

Кристофер Дж. Талбот, Мартин П. А. Джексон СОЛЯНАЯ ТЕКТОНИКА, с. 40.

Уильям Р. Френсли ТРАНЗИСТОРЫ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ, с. 52.

Энтони Дж. Легг, Питер А. Роули-Конуи МАССОВАЯ ОХОТА НА ДЖЕЙРАНОВ В КАМЕННОМ ВЕКЕ НА ТЕРРИТОРИИ СИРИИ, с. 62.

Роберт У. Шоу АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ, с. 72.

Джирл Уолкер МУЗЫКА И ПАРЫ АММИАКА РИСУЮТ НА МЫЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ, с. 82.

А.К. Дьюдни «ЛЕСТНИЦА СЛОВ»: ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ ГОЛОВОЛОМКИ И ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРА, с. 86.

НОЯБРЬ

Кумар Н. Пейтел, Николас Блумберген СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ОБОРОНА И ОРУЖИЕ НАПРАВЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ, с. 4.

Алан Дресслер КРУПНОМАСШТАБНЫЙ ПОТОК ГАЛАКТИК, с. 12.

Харолд Вармус ОБРАТНАЯ ТРАНСКРИПЦИЯ, с. 22.

Джеймс Л. Дай ЭЛЕКТРИДЫ, с. 30.

Спенсер К. Г. Барретт МИМИКРИЯ У РАСТЕНИЙ, с. 42.

Марк Хортон СУАХИЛИЙСКИЙ КОРИДОР, с. 50.

Джордж А. Миллер, Патриция М. Джилди КАК ДЕТИ УЧАТ СЛОВА, с. 60.

Ричард Э. Болзхайзер, Курт Э. Игер БУДУЩЕЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА УГОЛЬНОМ ТОПЛИВЕ, с. 68.

Джирл Уолкер ВЯЗКИЕ НИТИ ЖИДКОСТИ, ПРЕВРАЩАЮЩИЕСЯ В ЦЕПОЧКИ ШАРИКОВ, с. 78.

А.К. Дьюдни КОМПЬЮТЕР ПРИНИМАЕТ ГОСТЕЙ, с. 82.

ДЕКАБРЬ

Эйбрахам Пилед СЛЕДУЮЩАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ, с. 6.

Джеффри К. Фокс, Пол К. Мессина АРХИТЕКТУРА КОМПЬЮТЕРОВ, с. 16.

Джеймс Д. Мейндл МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРОВ, с. 26.

Дэвид Гелернтер СОВРЕМЕННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, с. 36.

Марк Х. Крайдер ТЕХНОЛОГИЯ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ, с. 46.

Джеймс Д. Фоли ЧЕЛОВЕКОМАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ, с. 58.

Роберт Е. Кан КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ, с. 66.

Пит Хат, Джеральд Джей Сассмен ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, с. 76.

Гленн Д. Реннелс, Эдвард Г. Шортлиф ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ, с. 86.

Альберт М. Эрисман, Кеннет В. Невис ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА, с. 96.

Джирл Уолкер НОВАЯ ГОЛОВОЛОМКА: «МАГИЧЕСКИЕ КВАДРАТЫ РУБИКА», с. 106.

А.К. Дьюдни «ПОСЛЕ ГВУ»: КОМПЬЮТЕРНАЯ ИГРА, В КОТОРОЙ МОДЕЛИРУЕТСЯ СТРАТЕГИЯ БОЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ, с. 110.

В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 20.11.87.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 1/8.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 8,00 бум. л.

Усл.-печ. л. 16,00.

Уч.-изд. л. 19,77.

Усл. кр.-отт. 65,36.

Изд. № 25/5521. Заказ 762.

Тираж 50000 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в Межиздательском

фотонаборном центре

издательства «Мир»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7



Издательство МИР предлагает:

Гардан И., Люка М.

**МАШИННАЯ ГРАФИКА
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОНСТРУИРОВАНИЯ**

Перевод с французского



Излагаются практические процедуры выполнения на ЭВМ чертежно-конструкторской документации в интерактивном режиме с использованием черно-белых и цветных дисплеев. Большое внимание уделено алгоритмам конструирования и рабочим программам для проектирования

изделий машиностроения, энергетических установок, зданий и сооружений.

Для инженеров-конструкторов, овладевающих методами автоматизированного конструирования, и студентов, изучающих машинную графику.

1987, 25 л. Цена 2 р. 10 к.



В следующем номере:



РОДОСЛОВНАЯ БОЛЬШОЙ ПАНДЫ

ПИТАНИЕ И РАК

ГЕЛИЕВЫЕ СВЕРХНОВЫЕ

ИСКУССТВЕННЫЕ ХРОМОСОМЫ

О НОВЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ДЕМОНЫ, ДВИГАТЕЛИ
И ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

РАННЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЛИВОВ В ИНТЕРЕСАХ ЭНЕРГЕТИКИ

МНОЖЕСТВО МАНДЕЛЬБРОТА
И РОДСТВЕННЫЕ ЕМУ МНОЖЕСТВА ЖУЛИА

СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В ЖИДКОСТЯХ