

В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Март **3** 1986

ОБРАЩЕННЫЙ
СВЕТ

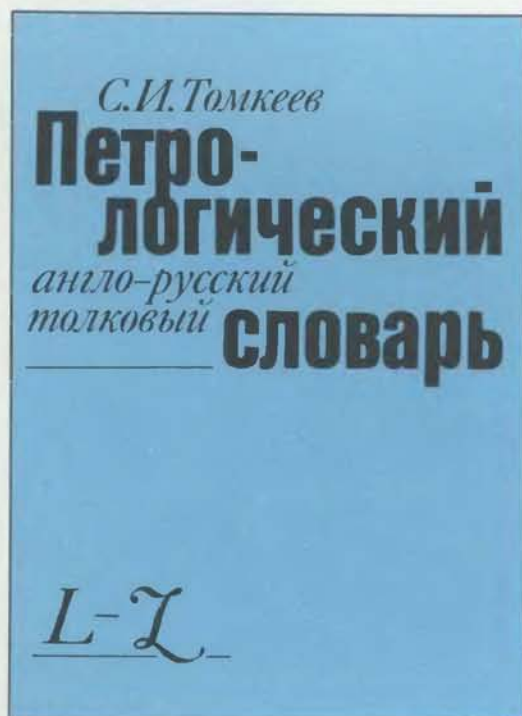
Издательство МИР предлагает:

С.И. Томкеев

**ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ
АНГЛО-РУССКИЙ ТОЛКОВЫЙ СЛОВАРЬ**

В 2-х томах

Перевод с английского



Петрологический словарь, составленный известным английским геологом русского происхождения С.И. Томкеевым, представляет собой весьма интересную и очень полезную книгу. Привлекательность работы С.И. Томкеева связана прежде всего с очень высокой профессиональной и общей культурой автора, являющегося не только одним из крупнейших геологов первой половины нашего века, но и человеком с весьма разнообразными интересами, в том числе в области истории, литературы, лингвистики и т.д., что было в традициях старой русской геологической школы.

В словаре приводятся четкие краткие определения примерно 8000 терминов, хорошо раскрыта номенклатура горных пород и охарактеризованы принятые в

петрографии понятия. Это уникальное издание содержит толкование также весьма редких терминов, которые нельзя найти в других справочниках. В соответствии со своим принципом — опираться в первую очередь на первоначальный смысл термина, С.И. Томкеев в отличие от большинства современных авторов включает в сферу петрологии и осадочные образования. Помимо собственно словаря в рассматриваемой книге имеются систематические таблицы, где термины сгруппированы по предметам исследования, так что словарь может быть использован как тезаурус.

Для геологов, преподавателей, аспирантов и студентов всех геологических специальностей и переводчиков геологической литературы.

1986, 88 л. Цена 6 р.95 к.



В МИРЕ НАУКИ

Scientific American · Издание на русском языке

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА

№ 3 · МАРТ 1986

В номере:

СТАТЬИ

- 4 **Космические исследования, космическая техника и космическая станция** *Джеймс А. ван Аллен*
Программа создания пилотируемой космической станции значительно уменьшит возможности развития американской космической техники и исследований, если она будет выполняться согласно существующему плану. Большая часть задач в космосе может быть выполнена успешнее автоматическими аппаратами
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 14 **Остановка злокачественного роста путем принудительной дифференцировки клеток** *Лео Сакс*
Размножение лейкоцитов и их дифференцировка в неделящиеся формы регулируются специфическими белками. Лейкемические клетки также можно принудить к дифференцировке; это открывает новые возможности для лечения рака
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 24 **Структура хвостов комет** *Джон К. Брандт, Малколм Б. Ниднер-младший*
Образование плазменного хвоста и отсоединение его от кометы — результат влияния солнечного ветра и его магнитного поля. Наблюдения комет Галлея и Джакобини — Циннера помогут лучше понять эти явления
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 34 **Применения обращения волнового фронта** *Дэвид М. Пеннер*
«Обращенные во времени» световые волны можно использовать для улучшения качества лазерного пучка, компенсации атмосферной турбулентности, слежения за движущимися спутниками, кодирования и декодирования сообщений и распознавания образов
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 46 **Образование месторождений из горячих источников на дне океана** *Питер Рона*
Морская вода, циркулирующая сквозь трещиноватые вулканические породы, расположенные над источниками тепла, участвует в обменных химических реакциях с этими породами. В результате образуются значительные по размерам рудные месторождения, ряд из которых в настоящее время находится на суше
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 56 **Химические средства защиты у высших растений** *Джералд А. Розенталь*
Некоторые химические вещества, образующиеся в растениях, ядовиты для травоядных животных или отпугивают их, другие снижают питательную ценность растений или нарушают нормальное развитие вредителей. В свою очередь травоядные животные находят пути, как использовать эти природные продукты
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 64 **Масс-спектрометрический метод радиоуглеродной датировки с использованием ускорителя** *Роберт Е. М. Хеджес, Джон А. Дж. Гаулетт*
Радиоактивный изотоп ^{14}C может быть отделен от других атомов в образце, что позволяет более точно определять возраст образца, даже если он имеет небольшую массу
(Scientific American, January 1986, Vol. 254, No. 1)
- 72 **Как головастики узнают родственников** *Эндрью Р. Блостейн, Ричард К. О'Хара*
Головастики лягушек *Rana cascadae* предпочитают жить вместе со своими «братьями» и «сестрами», которых они умеют отличать от неродственных особей. Способность узнавать родственников является, по-видимому, не результатом знакомства, а генетически обусловленным свойством
(Scientific American, January, 1986, Vol. 254, No. 1)

РУБРИКИ

- 3 Об авторах
13, 23, 45, 80, 96 Наука и общество
63 50 и 100 лет назад
84 Наука вокруг нас
90 Занимательный компьютер
99 Библиография

SCIENTIFIC AMERICAN

Jonathan Piel
PRESIDENT AND EDITOR
BOARD OF EDITORS

Philip Morrison
BOOK EDITOR

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

Samuel L. Howard
ART DIRECTOR

Richard Sasso
PRODUCTION MANAGER

George S. Conn
GENERAL MANAGER

Gerard Piel
CHAIRMAN

© 1986 by Scientific American, Inc.

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

В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Л. В. Шепелева

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

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

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ
И. В. Лунёва

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ФОТОНАБОРА
Г. С. Азимов

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Т. К. Такташова

КОРРЕКТОР
Р. Л. Вибке

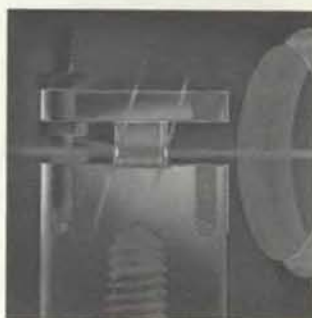
ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ,
ТИПОГРАФИКА РУССКОГО ИЗДАНИЯ,
МАКЕТ СМЕННЫХ ПОЛОС
М. Г. Жуков

ТИТУЛЬНАЯ НАДПИСЬ,
ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ
В. В. Ефимов

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

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

На обложке



ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

На рисунке изображено обращающее волновой фронт зеркало — устройство, способное исправлять оптические искажения. Любой световой пучок, попадающий на такое зеркало, возвращается к источнику «обращенным во времени»: отраженные световые лучи проходят траектории исходных лучей во встречном направлении. Обращающим зеркалом служит пластина кристалла титаната бария; размер каждой стороны пластины равен 5 мм. В кристалл вводится световой пучок, генерируемый лазером, изображенным справа. Часть света проходит сквозь кристалл. Основная же его часть, взаимодействуя с атомами кристалла, создает «обращенный во времени» пучок, распространяющийся назад к источнику. Обращенные пучки можно использовать для компенсации турбулентности атмосферы, в оптических вычислительных машинах, для исследования структуры атомов и слежения за движущимися спутниками (см. статью Дэвида М. Пеппера «Применения обращения волнового фронта» на с. 34). Рисунок сделан по экспериментальной схеме, собранной Р. Джейном, Р. Мак-Фарланом, К. Стенерсоном и К. Олсоном в Хьюзской научной лаборатории.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Hank Iken

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
5	Jet Propulsion Laboratory, с разрешения IBM Gallery of Science and Art, New York (<i>вверху и внизу слева</i>); Louis A. Frank, University of Iowa (<i>внизу справа</i>)	31	Yerkes Observatory	50-53	Hank Iken
6-7	Edward Bell	32	Edward Bell (<i>вверху</i>); American Museum of Natural History (<i>внизу</i>)	54	Andrew Tomko
8	Gabor Kiss	35	Jack Feinberg, University of Southern California	57	Isao Kubo, University of California at Berkeley
10	McDonnell Douglas Corporation	38	Jack Feinberg, Robert W. Hellwarth, University of Southern California	58-60	Patricia J. Wynne
15	Leo Sachs, Weizmann Institute of Science	39	Ian Worpole	65	Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, University of Oxford
16-17	Ilil Arbel	40	Gilmore J. Dunning, Richard C. Lind, William C. Keeler, Cliff W. Olson, Hughes Research Laboratories (<i>вверху</i>); Ian Worpole (<i>внизу</i>)	66-70	Andrew Christie
18	Leo Sachs, Weizmann Institute of Science	41-42	Ian Worpole	73	Andrew R. Blaustein, Richard K. O'Hara, Oregon State University
19-21	Ilil Arbel	47	Kyung-Ryul Kim, Scripps Institution of Oceanography	74-78	Tom Prentiss
24	Joint Observatory for Cometary Research	48-49	Andrew Tomko	84-89	Michael Goodman
26	Uwe Fink, University of Arizona			91	A. K. Dewdney
27-30	George V. Kelvin, Science Graphics			92-93	Ilil Arbel
				94	Ilil Arbel (<i>вверху</i>); Hale Observatories (<i>внизу</i>)

Об авторах

James A. Van Allen (ДЖЕЙМС А. ВАН АЛЛЕН «Космические исследования, космическая техника и космическая станция») — открыватель радиационных поясов Земли, которые обычно называют его именем. Получил степень доктора философии по физике в Университете шт. Айова в 1939 г. После работы в нескольких исследовательских учреждениях и службы в Тихоокеанском флоте во время второй мировой войны вернулся в Айову, где занимает должность профессора физики и возглавляет факультет физики и астрономии. Научная деятельность ван Аллена совпала по времени с развитием американской программы космических исследований. В 1958 г. во время первого успешного полета американского спутника «Эксплорер-1» были открыты пояса ван Аллена. Он руководил первыми исследованиями радиационных поясов Юпитера, когда сквозь них двигался космический зонд, и был одним из открывателей радиационных поясов Сатурна. Он также руководил исследовательскими группами, работавшими над проектами «Вояджер» и «Галилео». В настоящее время является научным руководителем проектов «Пионер-10» и «Пионер-11», а также принимает участие в работе над проектом «Галилео».

Leo Sachs (ЛЕО САКС «Остановка злокачественного роста путем принудительной дифференцировки клеток») — профессор биологии в Вейцмановском институте (Израиль), где возглавляет отдел генетики. В 1951 г. в Кембриджском университете получил степень доктора философии в области генетики растений. В 1952 г. стал сотрудником Вейцмановского института, где организовал отдел генетики и вирусологии. Помимо темы публикуемой статьи в круг научных интересов Сакса входит пренатальная диагностика рака и механизмы канцерогенеза.

John C. Brandt, Malcolm B. Niedner (ДЖОН К. БРАНДТ, МАЛКОЛМ Б. НИДНЕР-младший «Структура хвостов комет») — сотрудники лаборатории астрономии и космической физики Годдардовского центра космических полетов НАСА. С 1975 г. занимаются исследованиями крупномасштабных структур в кометах и физической кометной плазмы. Брандт получил степень доктора философии в области астрономии в Чикагском университете в 1960 г. В настоящее время — научный консультант по коме-

там в рамках проекта Международный кометный спутник (International Cometary Explorer) и член научной группы «Астро-Галлей». Научная группа «Астро-Галлей» будет контролировать работу телескопов видимого и ультрафиолетового диапазона на борту космического корабля шаттл, который планируют запустить в 1986 г. по программе «Астро-1». Ниднер получил степень доктора философии в области астрономии в Университете шт. Индиана в 1979 г. Он возглавляет научную группу «Астро-Галлей».

David M. Pepper (ДЭВИД М. ПЕППЕР «Применения обращения волнового фронта») — научный сотрудник оптико-физического отдела Хьюзской научной лаборатории. Сын оставшихся в живых узников фашистских концлагерей в годы второй мировой войны. Высшее образование получил в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе, а степень доктора — в 1980 г. в Калифорнийском технологическом институте. Помимо проблем, которым посвящена статья, в область его научных интересов входят оптическая обработка информации, квантовая электроника и лазерная химия. Пеппер является доцентом Университета Пеппердина, где преподает математику и физику.

Peter Rona (ПИТЕР РОНА «Образование месторождений из горячих источников на дне океана») — геофизик, старший научный сотрудник в Национальном управлении по исследованию океана и атмосферы и доцент на кафедре морской геологии и геофизики в Майамском университете. В 1956 г. в Университете Брауна получил степень бакалавра, на следующий год — в Йельском университете степень магистра. После этого работал в компании «Standard Oil». Спустя примерно два года Рона пришел к выводу, что будущее наук о Земле «лежит под океанским дном», и перешел в Хадсоновскую лабораторию Колумбийского университета для того, чтобы пополнить знания в области океанографии. Этот этап завершился в 1967 г. получением им степени доктора философии в области морской геологии в Йельском университете.

Gerald A. Rosenthal (ДЖЕРАЛД А. РОЗЕНТАЛЬ «Химические средства защиты у высших растений») профессор биологии и токсикологии Университета шт. Кентукки. Учился

сначала в Университете шт. Нью-Йорк в Сиракьюсе, а затем в Университете Дьюка, где в 1966 г. получил степень доктора философии в области физиологии и биохимии растений. Три года работал в Университете Кейс-Вестерн-Резерв, после чего стал сотрудником Университета шт. Кентукки. В качестве приглашенного профессора работал в Национальном университете в Сеуле и в Еврейском университете в Иерусалиме. В настоящее время ведет также исследования в Институте им. Луи Пастера в Страсбурге.

Robert E. M. Hedges, John A. J. Cowlett (РОБЕРТ Е. М. ХЕДЖЕС, ДЖОН А. ДЖ. ГАУЛЕТТ «Масс-спектрометрический метод радиоуглеродной датировки с использованием ускорителя»). Первые научные исследования Р. Хеджеса относятся к области физической химии. В 1968 г. получил степень доктора философии в Кембриджском университете. В течение 13 лет работает в исследовательской лаборатории археологии и истории искусства Оксфордского университета. Дж. Гаулетт — старший археолог в лаборатории радиоуглеродной датировки Оксфордского университета. В 1972 г. принимал участие в раскопках древних поселений в Кении. За работы в области археологии Кембриджский университет в 1979 г. присудил ему степень доктора философии.

Andrew R. Blaustein, Richard K. O'Hara (ЭНДРЬЮ Р. БЛОСТЕЙН, РИЧАРД К. О'ХАРА «Как головастики узнают родственников»). Блостейн получил степень бакалавра в 1971 г. в Саутгемптон-колледже в Нью-Йорке. На последних курсах специализировался в области экологических аспектов поведения животных. С этой целью в Университете шт. Невада в Рено изучал поведение пустынных грызунов и в 1973 г. стал магистром зоологии. В 1978 г. Калифорнийский университет в Санта-Барбара присвоил ему степень доктора философии в области биологии за исследование поведения, связанного с конкуренцией, у мелких млекопитающих. В этом же году стал сотрудником Университета шт. Орегон, где в настоящее время он доцент кафедры зоологии. О'Хара получил степени бакалавра (1972 г.) и магистра (1974 г.) зоологии в Университете шт. Мичиган. Затем перешел в Университет шт. Орегон, где в 1981 г. ему была присвоена степень доктора философии в области зоологии, и в настоящее время в качестве научного сотрудника занимается изучением индивидуального развития поведения и проблемой внутривидовой эволюции поведения.

Космические исследования, космическая техника и космическая станция

*Программа создания пилотируемой космической станции
значительно уменьшит возможности развития американской
космической техники и исследований, если она будет
выполняться согласно существующему плану. Большая часть задач
в космосе может быть выполнена успешнее
автоматическими аппаратами*

ДЖЕЙМС А. ВАН АЛЛЕН

В САМОМ понятии космоса есть нечто такое, что вызывает у людей желание придумывать фантастические проекты. Без всякого труда я могу задумать в любой день недели перед завтраком проект стоимостью в миллиард долларов, а в воскресенье — даже в несколько миллиардов долларов. Как правило, я не пытаюсь взваливать столь дорогостоящие проекты на плечи моих сограждан, однако хочу заметить, что некоторые предложения, обладающие сравнимыми или даже меньшими достоинствами и требующие гораздо больших расходов, привлекают к себе внимание общества, а к иным из них относятся весьма благосклонно и в правительственных кругах. На мой взгляд, предложение создать постоянно обитаемую космическую станцию относится именно к этой категории.

Национальная комиссия по освоению космического пространства (NCS), созданная по решению конгресса и назначенная президентом, с неожиданной смелостью взялась предсказать развитие программы космических исследований США на последующие 50 лет. Заключительный отчет этой комиссии, который должен быть опубликован в марте 1986 г., исходит из предположения, что космическая станция будет выведена на орбиту не позже чем через десять лет, как заявил в своем послании «О положении в стране» 1984 г. президент Рейган. Согласно планам Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА), космическая станция должна начать действовать к 1993 г. Затраты на ее создание оцениваются в 8 млрд. долл. (по курсу

1984 г.), однако, по всей вероятности, действительная стоимость проекта окажется в несколько раз выше. Об оценках эксплуатационных расходов и стоимости оборудования этой станции пока не сообщалось.

После вывода космической станции на орбиту NCS предполагает реализовать ряд дополнительных проектов с целью создания того, что она называет «инфраструктурой, необходимой для первоначального исследования и освоения внутренних областей Солнечной системы». Эти планы предусматривают сооружение еще трех космических станций: одной на высокой околоземной орбите, другой на орбите вокруг Луны и третьей на орбите вокруг Марса; вывод дополнительных станций на орбиты вокруг системы Земля — Луна или Земля — Марс, с тем чтобы они служили транспортными средствами для сообщения между Землей и Луной или планетами, и, наконец, постройку нескольких кораблей для полета астронавтов между различными космическими станциями, Землей, Луной и планетами. Многие должностные лица как в НАСА, так и вне его поддерживают также идею совместного полета американских и советских астронавтов на Марс. Наличие людей, живущих и работающих в космосе (что требует особых мер для обеспечения их жизнедеятельности и здоровья), является отличительной чертой всех основных проектов, которые предполагается рекомендовать президенту.

ПРИНЯТИЕ столь грандиозных планов людьми, обычно мыслящими вполне реалистически, можно

объяснить фантастическим представлением о космических полетах, складывавшемся на протяжении многих столетий благодаря усилиям писателей-фантастов как прошлого, так и наших дней. Действительно, для неспециалистов слова «космический полет» часто означают именно полет людей в космос. Страсть к приключениям и фантазиям, нашедшая свое выражение в этих представлениях, привела кое-кого к убеждению, что космос — это естественная среда обитания человека. Согласно этому убеждению, основной целью космической программы является «постоянное присутствие человека в космосе», причем сторонники этой цели не удосуживаются ответить на простой вопрос: «Зачем?» Вместе с одобрением, с которым публика встретила полеты, проводившиеся по программе «Аполлон», распространение таких взглядов побудило НАСА сделать основной упор на пилотируемые полеты: сейчас на них приходится около двух третей расходов НАСА.

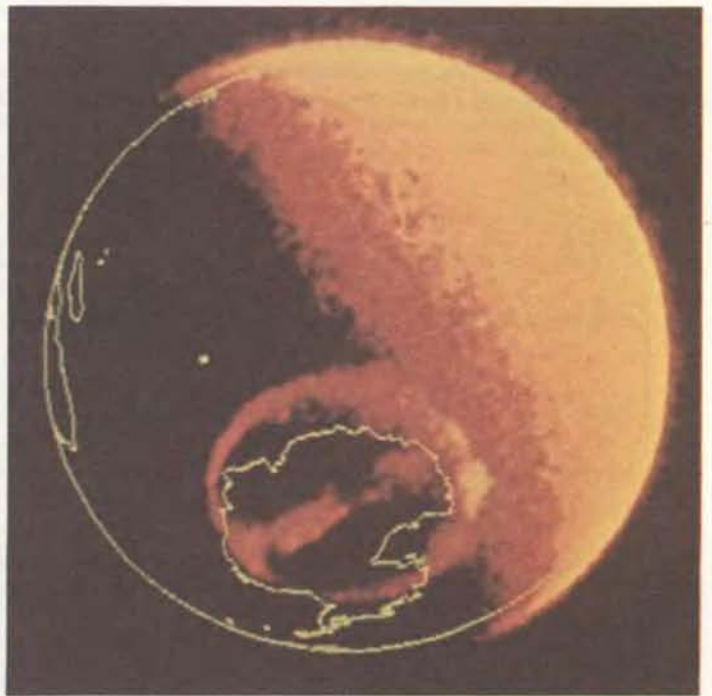
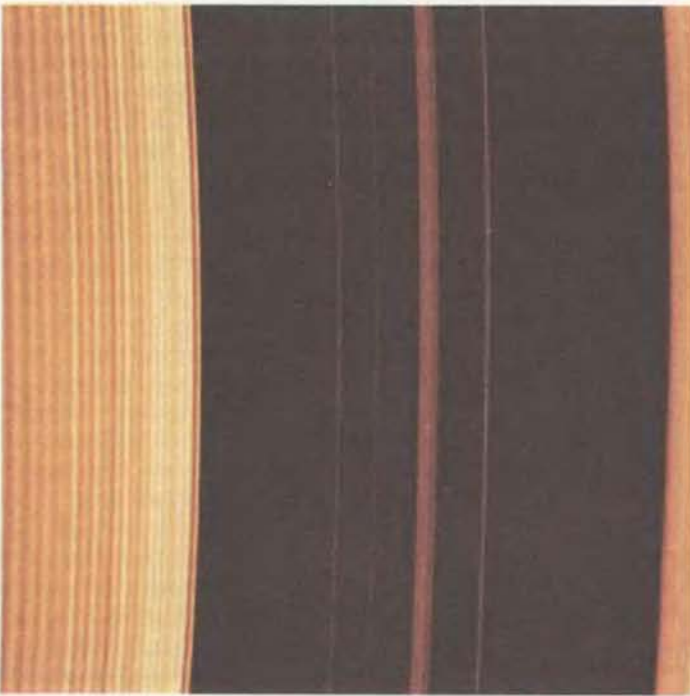
Однако эти тенденции, нашедшие свое воплощение в бюджетной политике НАСА, игнорируют основные уроки истории космических исследований: за 28 лет, прошедших со времени запуска первого советского спутника, подавляющее большинство научных и практических достижений в космосе было связано с использованием непилотируемых автоматических и управляемых на расстоянии аппаратов. Например, программа исследования планет с помощью зондов-автоматов оказалась необыкновенно успешной и внесла огромный вклад в расширение наших знаний. Автоматические спутники, выведен-

ные на околоземную орбиту, произвели подлинную революцию в области связи и навигации, а также позволили нам значительно продвинуться в изучении атмосферы, океанов и распределения природных ресурсов. Нако-

пец, они укрепили национальную безопасность, выполняя разведывательные функции.

Во избежание недоразумений я должен сразу оговориться, что у меня нет никаких сомнений в том, что со-

оружение космической станции или даже системы таких станций технически вполне возможно и для этого требуются лишь соответствующие ресурсы. Более того, я ничуть не сомневаюсь и в том, что можно найти важ-



ДЕТАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ далеких планет символизируют достижения научной космической программы, использующей зонды-автоматы. На фотографии слева сверху мы видим бурю на Марсе; изображение было передано орбитальным аппаратом «Викинг-1» и обработано в условных цветах, чтобы сделать детали более заметными. Справа сверху помещено изображение Юпитера, построенное с помощью компьютера по данным, переданным «Вояджером-1». Планета видна здесь из точки, находящейся точно над Южным полюсом. На самом деле ни один космический аппарат не фотографировал Юпитер с этого направления. Пока нет никаких фотографических данных о черном участке неправильной формы в центре изображения. Ярко-красная полоса на изображении в условных цветах слева внизу — это тонкое кольцо в щели Энке во внешнем

основном кольце (Кольце А) Сатурна; изображение построено компьютером по данным, полученным с помощью фотополариметра на борту аппарата «Вояджер-2», который зарегистрировал ослабление света звезд при прохождении через кольца. На изображении справа внизу заметен в виде желтого кольца и поперечной полосы южный полярный авроральный овал Земли, на который наложены контуры Антарктиды. Эта фотография была передана спутником «Dynamics Explorer». Первые три изображения получены в Лаборатории реактивного движения и приводятся здесь с разрешения Галереи науки и искусства IBM (Нью-Йорк). Изображение полярных сияний над Антарктидой приводится с разрешения Л. Франка из Университета шт. Айова.

ные области применения этих станций. Однако эта проблема имеет не только техническую сторону, ведь создание и обеспечение функционирования космической станции неизбежно поглотит большую часть ресурсов, выделяемых на национальную программу космических исследований. Таким образом, планы запуска космической станции неизбежно связаны с фундаментальным вопросом о том, какие экономические, политические и культурные цели преследует эта программа.

Космическая наука и техника достигли такой ступени развития, когда мы можем делать компетентный, четко определенный и реалистический выбор целей и разумное определение их приоритетности. Тогда и только тогда, когда это уже сделано, имеет смысл рассматривать вопросы о выборе наилучших технических средств для достижения этих целей, соответствующих сроках и необходимых ресурсах. Как мне кажется, основные цели программы космических исследований можно разделить на чисто практические, для которых легко определить расходы и прибыли, и культурные, для которых это сделать значительно труднее.

Одной из разновидностей практических целей являются военные применения, которых, как принято считать, требуют наши национальные интересы. К другой группе практиче-

ских целей относятся невоенные применения космической техники, которые либо удовлетворяют национальным интересам и финансируются государством, либо могут найти себе покупателя на рынке. Что касается культурных целей, то они также имеют немаловажное значение. Достаточно вспомнить хотя бы чувство сопричастности, которое возбудили у всех программа «Аполлон» и ей подобные. Такое чувство можно также отнести к духовным ценностям. Точно так же следует признать, что проведение научных наблюдений и экспериментов в космосе, даже если они не обещают практических результатов, удовлетворяет нашим духовным запросам. Разумеется, даже чисто фундаментальные научные исследования почти всегда приводят к результатам, имеющим определенное, подчас немалое практическое значение, так что даже если рассматривать науку лишь как область для удовлетворения духовных потребностей, это не будет означать, что она не может дать ощутимых практических результатов.

ПОСКОЛЬКУ первоначально программа космических исследований США была преимущественно военной, то начнем обсуждение именно с этой категории практических задач. Военные применения космической техники можно разделить на оборо-

нительные и наступательные. До настоящего момента первые, к счастью, преобладали над последними, во многом благодаря ряду договоров и решений ООН о мирном использовании космического пространства. В число оборонительных функций космической техники входят глобальная разведка и связь, проведение океанографических, геодезических, метеорологических и навигационных наблюдений.

Трудно опровергнуть утверждение, что ведение всеми потенциальными противниками постоянных и эффективных разведывательных наблюдений уменьшает напряженность в мире, ведь такая разведка позволяет заранее узнать о военных приготовлениях другой стороны и тем самым уменьшает элемент внезапности и дает время для экстренных переговоров. Из этого следует, что США, СССР и КНР могли бы участвовать в совместной программе разведывательных наблюдений, результаты которых с последующей их интерпретацией были бы доступны для каждой из этих стран. При таком подходе разведывательные наблюдения носили бы чисто контролирующий характер, а военные действия стали бы восприниматься как нечто бессмысленное, чего они полностью заслуживают в современном мире. До сих пор военные функции в космосе возлагались почти исключительно на автоматические спутники, и у нас есть все основания полагать, что так будет и в дальнейшем.

Сторонники полетов человека в космос утверждают, что только пилотируемые корабли дают возможность отремонтировать спутники прямо на орбите или заменить все или некоторые их части. Однако и этот аргумент неубедителен. Многие автоматические спутники и зонды, находящиеся сейчас в космосе, рассчитаны примерно на 10 лет работы. Их основные устройства дублированы и переключаются автоматически или по команде с Земли, что позволяет продлить срок службы аппарата. За десять лет большая часть оборудования настолько морально устаревает, что ремонт и техническое обслуживание спутников на орбите не являются экономически оправданными.

Что же касается размещения в космосе наступательных вооружений, таких, например, как противоспутниковое оружие, то здесь возникает серьезный вопрос о том, насколько это соответствует национальным интересам, но этот вопрос выходит за рамки рассматриваемой темы. Независимо от того, согласны ли вы со мной, что призывы к наращиванию



Годовой бюджет НАСА в долларах 1982 г. представлен на графике черной линией, а ассигнования на фундаментальные и прикладные исследования в космосе — цветной линией. Наивысший уровень расходов НАСА был достигнут в середине 60-х годов, в период подготовки полетов астронавтов на Луну по программе «Аполлон». В тот же период затраты на фундаментальные и прикладные исследования были ниже затрат на программы пилотируемых космических полетов. С тех пор общий бюджет НАСА упал до трети своего наивысшего уровня, а на фундаментальные и прикладные научные исследования выделяется около 15% всех ассигнований.

вооружений в космосе опасны, вы можете быть сторонником точки зрения, что это наращивание устранит причину моего беспокойства относительно проекта создания космической станции. Как полагают некоторые, сколь бы ни был неприятен факт милитаризации космоса, он имеет и свою положительную сторону в том смысле, что при создании военного защитного зонта щедроты перепадут как программе космических исследований с помощью пилотируемых станций, так и программе, основанной на использовании автоматических космических аппаратов.

НА ПЕРВЫЙ взгляд такая точка зрения может показаться убедительной. Те из нас, кто помнит шок, испытанный Америкой после успешного запуска первого советского спутника в октябре 1957 г., почти не сомневаются, что именно перспективы военного использования космического пространства стимулировали нашу последующую деятельность в этой области. Действительно, президент Л. Джонсон однажды сказал, что выгоды от американской системы разведывательных спутников с лихвой перекрывают все расходы на национальную программу космических исследований. Тем не менее ссылаться на подобные заявления в современных условиях — значит игнорировать изменения в политике финансирования обороны, введенные конгрессом с начала 70-х годов. Министерству обороны приходится теперь придерживаться относительно узкого определения своих задач. Именно этими изменениями объясняется в значительной степени уменьшение финансирования министерством обороны фундаментальных научных исследований в начале 70-х годов. Это министерство вряд ли станет подрывать доверие к себе со стороны конгресса поддержкой грандиозных начинаний, не служащих явно интересам обороны. Я предполагаю, что ни программа исследований с помощью космической станции, ни многие другие научные проекты, с которыми она конкурирует, не получат сколько-нибудь значительных субсидий из бюджета министерства обороны.

Таким образом, нам остается рассмотреть лишь те цели, которые нельзя прямо отнести к военным. История невоенной программы космических исследований США показывает, что после максимальных ассигнований, имевших место в середине 60-х годов в ходе выполнения программы «Аполлон», уровень ассигнований понизился примерно в 3 раза и в течение более десяти лет оставался почти не-

изменным. Возможно, так считаю и я, было бы лучше, если бы уровень федеральных ассигнований космических исследований возрастал, но он определяется сложными социальными и политическими процессами, протекающими в нашем обществе, и трудно, если вообще возможно, предвидеть сколько-нибудь значительное увеличение реальных ассигнований в предстоящем десятилетии. С другой

стороны, нет никаких оснований ожидать и их нового значительного падения в ближайшем будущем.

Таким образом, можно сказать, что в настоящее время по вопросу об общем объеме программы космических исследований в США сложилось приблизительное равновесие сил между энтузиастами и скептиками. Исходя из этого, в моих дальнейших рассуждениях предполагается, что ас-

ЧИСТО КОММЕРЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Глобальная система ретрансляционных спутников на геостационарных орбитах для передачи телевизионных программ, телефонных и телеграфных сообщений и информации

ВОЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Глобальная система спутников связи на геостационарных и промежуточных орбитах

Глобальная сеть спутников Системы глобального позиционирования для целей навигации. Сегодняшняя точность — около 30 м в любой точке земной поверхности и в прилегающем космическом пространстве. Предполагается увеличение точности до 1 см. Также имеется система с меньшей точностью, используемая в невоенных целях

Система разведывательных спутников

Система метеорологических спутников

ЧАСТИЧНО КОММЕРЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Метеорологические спутники для геодезической съемки и краткосрочных глобальных прогнозов погоды

«Ландсат» и другие спутники для поисков залежей полезных ископаемых, наблюдения за растительным покровом, айсбергами, снежным покровом, водными ресурсами, загрязнением гидросферы, состоянием посевов, геологическими структурами и для картографирования

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитные и корпускулярные виды излучения Солнца, их воздействие на Землю

Динамика атмосферы Солнца

Измерения заряженных частиц, магнитного и электрического полей в ионосферах, радиационных поясах и магнитосферах Земли, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна прямыми методами. Плазменные эффекты, связанные с естественными и искусственными кометами

Геологические исследования Луны, Земли, Меркурия, Венеры, Марса и его спутников, Юпитера и Сатурна

Детальные исследования колец Юпитера и Сатурна

Исследования внешних магнитных полей Луны, Земли, Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна

Детальные исследования структуры, состава, динамики земной атмосферы и исследования атмосфер Венеры, Марса, Ио, Сатурна и Титана

Детальное описание внешних гравитационных полей Земли и Луны

Исчерпывающие наблюдения солнечного ветра, ударных волн, энергетических солнечных частиц и космических лучей галактического происхождения в межпланетном пространстве вплоть до расстояний в 5,8 млрд. км от Солнца и более

Детальный обзор звездных и планетарных источников гамма-, рентгеновского и ультрафиолетового излучения, в инфракрасном и радиодиапазоне, детальные спектральные исследования отдельных источников

Заметные успехи в объяснении происхождения и эволюции Солнечной системы, звезд и галактик

Значительный вклад в физику плазмы и изучение ее роли в планетных и астрофизических системах

Изучение океанических течений и глобальной динамики океанов

Результаты, свидетельствующие об отсутствии в прошлом и в настоящем живых организмов на поверхности Марса

В ТАБЛИЦЕ подытожены все достижения непилотируемых космических полетов. Они включают коммерческие, военные и невоенные применения космической техники, а также множество научных достижений.

сигнования на эти цели останутся в течение ближайших десяти лет практически неизменными. Это в свою очередь означает, что установление национальных приоритетов в «невоенном секторе» космической программы — это игра с нулевой суммой, т. е. любое возрастание одной части бюджета НАСА неизбежно вызовет точно такое же уменьшение какой-то другой его части.

ВТОРАЯ по значимости категория национальных целей в космосе — это развитие космической техники, включая космическую станцию и прочую «инфраструктуру», о которой говорилось в документах NCS. Сторонники создания пилотируемой космической станции часто выглядят обиженными, когда слышат о бюджетных ограничениях. Разве мы, т. е. я и те из моих коллег, кто принадлежит к «лояльной оппозиции», не понимаем, что, когда космическая станция будет выведена на орбиту, затраты, требуемые для выполнения коммерческих и научных программ, значительно уменьшатся? Разве мы не слышали о так называемом эффекте увлечения, который означает, что программа, связанная с использованием пилотируемых аппаратов, якобы настолько

«разгоняет» всю национальную космическую программу, что «увлекает» за собой и все другие проекты? Разве мы настолько увлеклись достоинствами дистанционно управляемых аппаратов, что начали игнорировать тот факт, что человек в космосе может выполнять те же задачи легче и эффективнее?

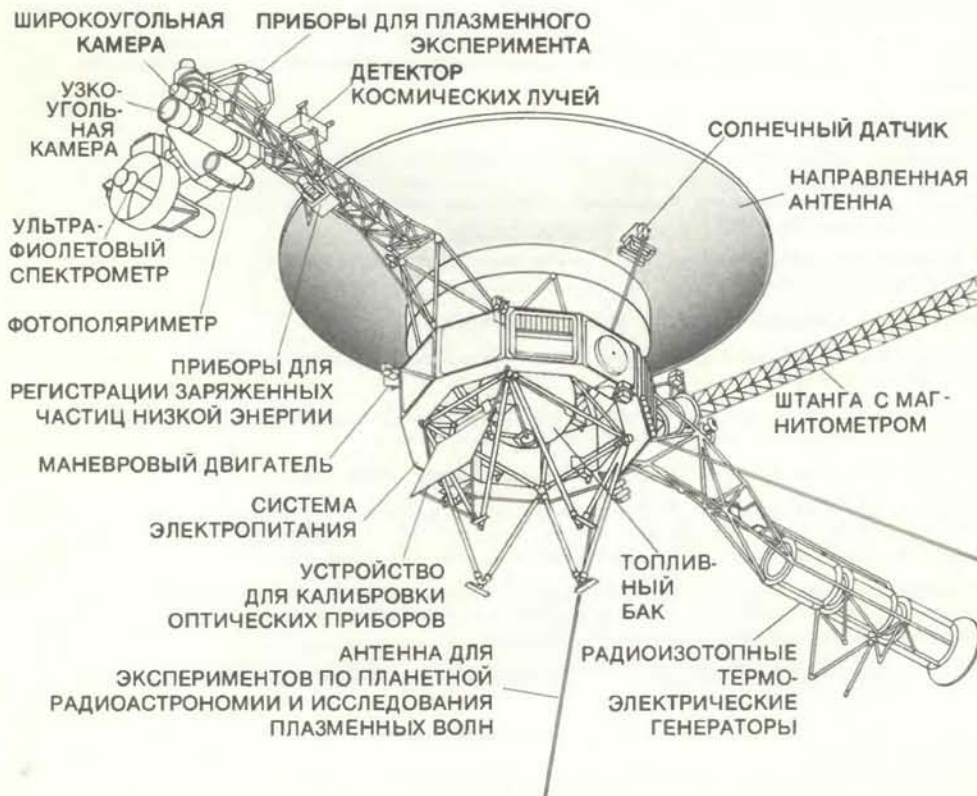
Отвечая на эти вопросы, лучше опираться не на обещания и предсказания заинтересованных сторон, а на уроки реализации нашей космической программы, в особенности Космической транспортной системы. В настоящее время эта система включает четыре шаттла, или пилотируемых корабля многоцелевого использования (в сущности, представляющие собой комбинацию скоростного самолета и космического корабля), которые сначала выводятся на низкую орбиту, затем снова входят в атмосферу по команде и приземляются на очень длинную посадочную полосу. Создание и использование Космической транспортной системы уже обошлись американским налогоплательщикам примерно в 30 млрд. долл., причем к этому следует прибавить гораздо меньшую, но тоже весьма значительную сумму, вложенную странами Европы через Европейское космическое агент-

ство. Четыре шаттла, составляющие сейчас «космический флот» США, были задуманы — и рассматриваются до сих пор — как транспортные средства, предназначенные для обслуживания космической станции. Таким образом, имеет смысл рассматривать такие корабли как ключевой элемент американской программы пилотируемых космических полетов на ближайшие 20 лет.

Шаттл воплощает вполне естественное желание инженеров-авиастроителей довести свое искусство до пределов возможного. Хотя я от всей души восхищаюсь этими выдающимися техническими достижениями, я тем не менее нахожу экономическое обоснование создания этого корабля недостаточно убедительным и эту точку зрения я отстаивал перед Управлением технологических оценок и целым рядом комитетов конгресса начиная с 1971 г. Те из нас, кто во время дебатов начала 70-х годов выступали против разработки шаттла и потерпели поражение, без труда вспомнят, какие тогда делались заявления. Наши оппоненты говорили, что шаттл заменит все одноразовые носители, такие, как ракеты «Скаут», «Дельта», «Атлас» и «Титан», и что к началу 80-х годов ежегодно будет совершаться до 50 полетов шаттлов. Каждый из них сможет поднимать на низкую околоземную орбиту более 20 т груза, причем стоимость доставки будет лишь 220 долл. за 1 кг. Из пятидесяти ежегодных полетов по меньшей мере четыре будут поднимать аппараты, предназначенные для исследования других планет.

Однако между этими заявлениями и современным положением дел имеется огромный разрыв. В 1985 г. шаттлы совершили лишь 10 полетов, причем стоимость подъема 1 кг груза была не менее 11 тыс. долл., или около 4400 долл. по курсу 1971 г., т. е. в 20 раз больше первоначальной оценки! И за все четыре года полетов шаттлов не был запущен ни один аппарат для исследования планет!

Причинами такого несоответствия с действительностью являются значительная недооценка НАСА затрат на разработку корабля многоцелевого использования и столь же значительная переоценка объема перевозок грузов с помощью этого корабля. В результате НАСА сделало сверхоптимистическую оценку экономической окупаемости шаттла по сравнению с одноразовыми ракетами-носителями того времени или с их будущими «потомками». Я не вижу никаких оснований относиться с большим доверием к экономическим прогнозам НАСА, связанным с космической станцией.



СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ космического аппарата «Вояджер-2». Этот зонд уже исследовал Юпитер, Сатурн и их системы спутников и колец. Он был первым космическим аппаратом, достигшим планеты Уран (январь 1986 г.). Автор этой статьи был председателем комитета, разработавшего программу полета этого аппарата.

СУЩЕСТВУЕТ еще одна причина сомневаться относительно заверений НАСА, что космическая станция поможет выполнению других программ. Летом 1981 г. ввиду серьезного отставания от плана и значительных перерасходов по программе создания шаттла НАСА решило, не смотря ни на что, продолжать эту программу, и если понадобится, за счет других программ. Результатом этого решения явилось «избиение младенцев»: были сокращены, отложены или вовсе отменены десятки программ, хотя выполнение некоторых из них было уже в самом разгаре.

Например, из-за программы «Спейс шаттл» была прекращена работа над американским аппаратом, который должен был входить в состав пары дополняющих друг друга аппаратов для Международного солнечного полярного эксперимента. Второй аппарат, известный сейчас как «Улисс», создается Европейским космическим агентством при участии группы американских ученых и будет запущен в мае, с опозданием примерно на два года. Также из-за этой программы были отменены уже разработанные планы запуска американского зонда, который должен был встретиться с кометами Галлея и Темпль II. Новая важная программа исследования планеты Юпитер, известная под названием «Галилео», была приостановлена из-за недостатка средств на создание корабля многоцелевого использования, и, хотя позже эта работа возобновилась, программа «Спейс шаттл» в значительной степени ответственна за ее трехлетнее отставание от первоначального графика.

Чрезмерная приверженность НАСА к проекту «Спейс шаттл» ничем не ограничивалась в течение первых восьми месяцев пребывания Рейгана на посту президента. Когда же он, наконец, назначил своего директора НАСА, отмененных и урезанных программ оказалось так много, что работу над многими из них пришлось возобновить. Среди этих программ, оказавшихся под угрозой, были глобальная система дальней космической связи для слежения и приема сигналов от планетных зондов; продолжение приема данных с аппаратов «Пионер-10», «Пионер-11» и «Пионер Венус-1», Инфракрасная обсерватория НАСА в Мауна-Кеа (Гавайи), прием данных с зондов «Вояджер-1» и «Вояджер-2», исследующих дальние области Солнечной системы, и искусственных спутников Земли ИМП-7 и ИМП-8, а также планы отправки новых зондов на Венеру и Марс. Кроме того, повышение относительного

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ПОЛЯРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ (АМЕРИКАНСКИЙ СПУТНИК В СОСТАВЕ ПРЕДПОЛАГАВШЕЙСЯ ПАРЫ)	ОТМЕНЕН
АМЕРИКАНСКИЙ ЗОНД К КОМЕТЕ ГАЛЛЕЯ	ОТМЕНЕН
ЗОНД «ГАЛИЛЕО» К ЮПИТЕРУ	ПРИОСТАНОВЛЕНА (ПОЗЖЕ ВОЗОБНОВЛЕНА)
СИСТЕМА ДАЛЬНЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПЛАНЕТНЫМИ ЗОНДАМИ	ОКАЗАЛАСЬ ПОД УГРОЗОЙ ЗАКРЫТИЯ
ПРИЕМ ДАННЫХ С «ПИОНЕРА-10» И «ПИОНЕРА-11»	ПРЕКРАЩЕН (ПОЗЖЕ ЧАСТИЧНО ВОЗОБНОВЛЕН)
ПРИЕМ ДАННЫХ С «ПИОНЕРА ВЕНУС-1»	ПРЕКРАЩЕНА (ПОЗЖЕ ЧАСТИЧНО ВОЗОБНОВЛЕНА)
ИНФРАКРАСНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ В МАУНА-КЕА (ГАВАЙИ)	ЗАКРЫТА (ПОЗЖЕ ОТКРЫТА)
ПРИЕМ ДАННЫХ С «ВОЯДЖЕРА-1» И «ВОЯДЖЕРА-2»	СОКРАЩЕН (ПОЗЖЕ ЧАСТИЧНО ВОЗОБНОВЛЕН)
ПРИЕМ ДАННЫХ С ИМП-7 И ИМП-8	ПРЕКРАЩЕН (ПОЗЖЕ ЧАСТИЧНО ВОЗОБНОВЛЕН)
ПРОГРАММА «ЛАНДСАТ»	СОКРАЩЕНА
ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ	ОТЛОЖЕНА НА НЕСКОЛЬКО ЛЕТ
ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ ПОЛЕТЫ ЗОНДОВ К ВЕНЕРЕ И МАРСУ	ОТМЕНЕНЫ (ВОЗОБНОВЛЕНЫ В СОКРАЩЕННОМ ВИДЕ ПОСЛЕ ЗАДЕРЖКИ НА НЕСКОЛЬКО ЛЕТ)
ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ В УНИВЕРСИТЕТАХ	СОКРАЩЕНА
ОТДЕЛ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ ПРОГРАММ НАСА	ЗАКРЫТ
ЗАПЛАНИРОВАННЫЙ ЗАПУСК СПУТНИКОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ И АТМОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	ОТЛОЖЕН НА НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ СРОК
РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БОРТУ КОРАБЛЕЙ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	НЕДОСТАТОЧНО ФИНАНСИРУЕТСЯ
СОЗДАНИЕ НОВЕЙШЕЙ ТЕХНИКИ СВЯЗИ	ОТЛОЖЕНО НА НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ СРОК

«ИЗБИЕНИЕ МЛАДЕНЦЕВ» было результатом решения НАСА, принятым в 1981 г., продолжать выполнение программы «Спейс шаттл» за счет других программ. В таблице представлены результаты этого решения. Некоторые из отмененных программ были впоследствии возобновлены, но в целом по научным исследованиям и другим невоенным применениям космической техники был нанесен серьезный удар.

приоритета проекта «Спейс шаттл» привело к замедлению работы по созданию гамма-обсерватории, значительному уменьшению ассигнований, направляемых на поддержку работ по космическим исследованиям и технике в университетах и закрытию отдела программ по солнечно-земной физике НАСА. Тогда же были отложены на неопределенный срок запуск на околоземную орбиту новых спутников, предназначенных для солнечно-земных и атмосферных исследований, и разработка новейшей техники связи. Наконец, объем ведущихся ныне работ по созданию научной аппаратуры, выводимой на орбиту кораблями многоцелевого использования, явно недостаточен.

СУЩЕСТВУЮТ еще два аргумента, к которым иногда прибегают сторонники программы пилотируе-

мых полетов и которые нам следует рассмотреть. Первый из них — это несколько странный вывод, сделанный при анализе истории нашей космической программы, который я уже упоминал как «эффект увлечения». Согласно этой точке зрения, вся программа космических исследований за последние три десятилетия оказалась возможной или, во всяком случае, достигла значительных масштабов лишь благодаря программе пилотируемых полетов. Это утверждение нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть, так как мы не можем «пережить» историю заново с другими граничными условиями. Тем не менее я могу привести несколько соображений, противоречащих такому утверждению.

В 1946 г. в США начались активные и весьма успешные эксперименты с использованием приборов, поднимаем-

шихся ракетами на большие высоты. Эта деятельность, достигшая своего апогея во время проведения Международного геофизического года в 1957—1958 гг., послужила технической и научной основой для последующего развития научного и практического использования искусственных спутников Земли, а также межпланетных и планетных аппаратов. Период наиболее быстрого роста в этих областях совпадал по времени с программой «Аполлон», однако, как мне кажется, ни одна из этих программ не зависела в сколько-нибудь значительной степени от другой.

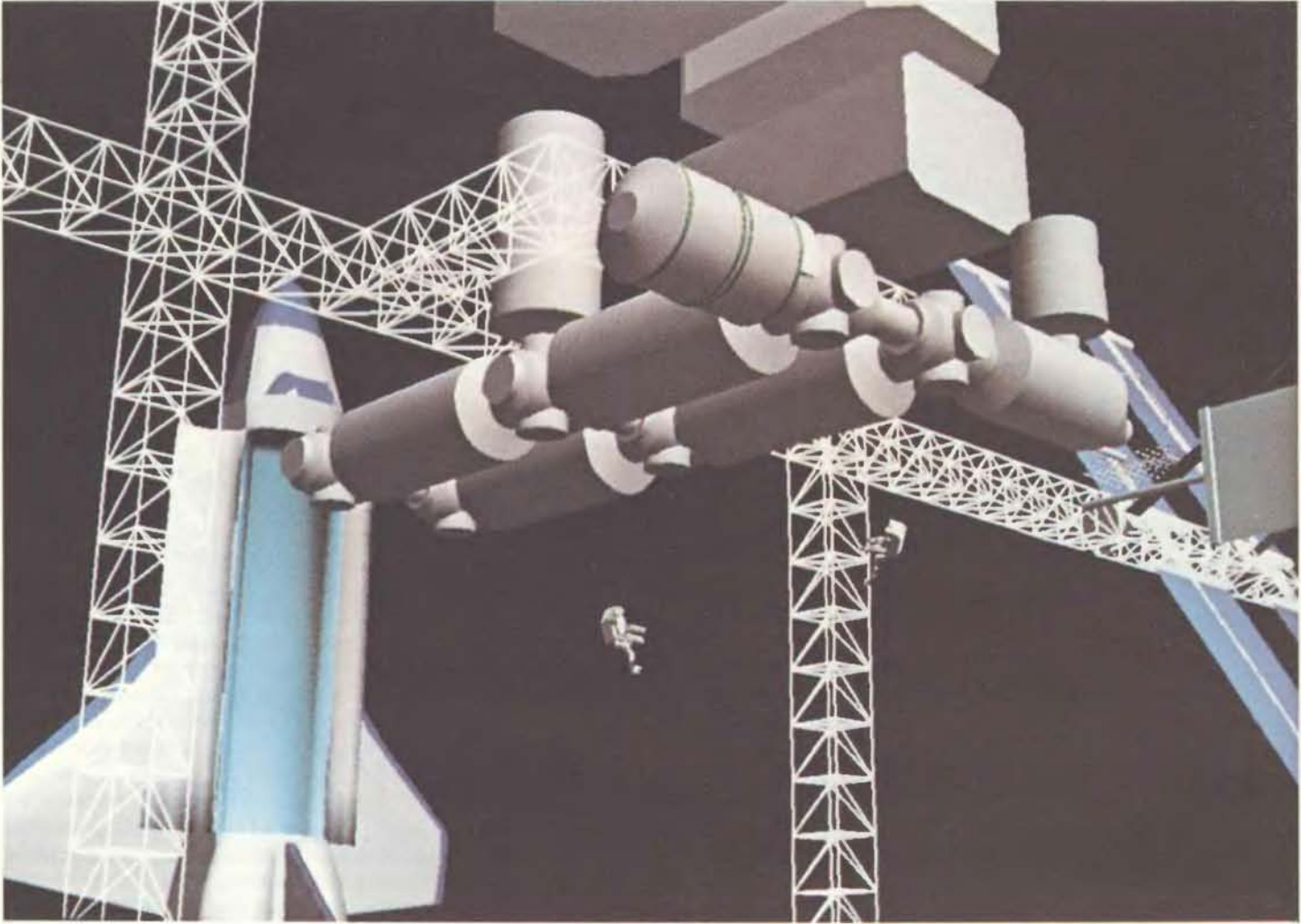
И упомянутые выше научные исследования, и программа «Аполлон» проводились в эпоху, характерными чертами которой как в Америке, так и во всем мире были оптимизм и бурный рост во всех областях, в том числе и в науке, не связанной с космосом. Многие другие крупные исследовательские учреждения при федеральном правительстве стали тогда получать

субсидии, сравнимые со средствами, отпускавшимися НАСА на научные исследования, хотя они и не проводили грандиозных программ, захватывающих воображение широкой публики. В качестве примеров достаточно привести национальные институты здравоохранения, Национальный научный фонд, геологическую службу США, министерство энергетики и Национальное управление по исследованию океана и атмосферы.

Второй аргумент, часто приводимый для обоснования необходимости пилотируемых полетов, заключается в том, что человек в космическом корабле обладает превосходством по сравнению с какой угодно машиной благодаря своей способности делать суждения, благодаря изобретательности, гибкости реакции и т. п. Однако, если принять во внимание сложность и высокий технический уровень современного оборудования для космических исследований, а также контроль, легко осуществимый за ним с

наземных станций, этот аргумент уже не будет выглядеть столь убедительно.

Свое отношение к этому вопросу мне проще всего выразить, пересказав один анекдот, восходящий к эпохе стратосферных исследований и полетов людей на стратостатах. В то время, около 30 лет назад, нашлись люди, выступавшие с идеей создания и постоянного поддержания широкой сети пилотируемых стратостатов для наблюдения как за природными явлениями, так и за человеческой деятельностью на Земле. Меткую характеристику идеям такого рода дал Эдвард П. Ней из Миннесотского университета, один из пионеров научных исследований с использованием стратостатов. Однажды, в конце 50-х годов, Ней прочитал публичную лекцию о некоторых аспектах своей работы. Во время последовавшего за лекцией обсуждения один из слушателей встал и задал такой вопрос: «Профессор Ней, скажите, может ли человек в гондole



КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, возможно, будет иметь такой вид, как показано на этом рисунке, хотя окончательных решений относительно ее конструкции еще не принято. Этот вариант конструкции — один из последних и отличается от предыдущего тем, что имеет две главные «башни» вместо одной. На этом изображении, полученном с помощью компьютера, нам видна лишь часть космической станции с причалом для шаттла. Масштаб задан фигурами людей воз-

ле правой башни. Сегодня замена одного проекта на другой ничего не стоит — достаточно поменять изображения на дисплее автоматизированной системы проектирования. Однако, согласно планам НАСА, уже к 1993 г. одно из подобных электронных изображений будет превращено в действующую орбитальную станцию. Сумма, которую потребует это превращение, может оказаться весьма солидной — 30 млрд. долл. по курсу 1984 г.

стратостата сделать что-нибудь такое, чего не может сделать прибор?» После минутного колебания Ней ответил: «Да, может. Но зачем ему подниматься для этого на такую высоту?».

НАКОПЛЕННЫЙ нами опыт показывает, что, если отвлечься от эмоций, которые вызывают у нас приключения, необходимость посылать людей в космос не так уж велика. Напротив, у нас имеются веские основания оставлять людей, управляющих приборами для космических исследований, здесь, на Земле. Системы обеспечения жизнедеятельности и особо важные меры по обеспечению безопасности экипажа любого пилотируемого корабля обходятся очень дорого и накладывают на наши планы серьезные ограничения. Более того, большинство значительных научных и практических результатов могут быть получены лишь с помощью аппаратов, выведенных на высокие околоземные, лунные, межпланетные или околопланетные орбиты и действующих там в течение нескольких месяцев или даже лет. Такие задачи еще долго нельзя будет возлагать на пилотируемые космические корабли.

Некоторые эксперименты, которые нам хотелось бы провести в космосе, требуют очень устойчивых платформ и поддержания точной ориентации научных приборов так, чтобы не было никаких вибраций или ускорений. Если астронавт на борту кашляет, он может нарушить ход сверхчувствительного эксперимента в микрогравитационном поле; облачка газа или капельки жидкости из сопла корабля и выбросы воды или продуктов жизнедеятельности экипажа могут загрязнить локальный вакуум и оптические условия наблюдений, а магнитные и электрические поля, возникающие внутри и вокруг пилотируемого корабля, препятствуют проведению определенных видов наблюдений в радиодиапазоне.

Самый простой ремонт или наладка оборудования превращается в условиях космоса в настоящий подвиг. Высокая стоимость такого «космического аварийного ремонта» вызывает серьезные сомнения в его экономической оправданности. Более того, гораздо труднее и дороже разработать и изготовить оборудование таким образом, чтобы его можно было ремонтировать и налаживать в космосе, чем создать аппаратуру, которую не надо специально приспособлять для этого.

Условия на борту космического корабля накладывают на работу людей,

в частности на проведение экспериментов, многочисленные ограничения. Все, что мы можем ожидать от экипажа, — это выполнение простых функций квалифицированного техника, в то время как все действительно тонкие и хитроумные эксперименты управляются переданными по радио командами или запрограммированы в оборудовании еще до запуска, так же как и на автоматических аппаратах. Почти все исследования могут значительно эффективнее проводиться под наблюдением и контролем людей, находящихся на земле, работающих в гораздо более удобных условиях и обладающих доступом ко всем имеющимся там ресурсам. Наконец, аппаратура на борту автоматического зонда или спутника не подвержена усталости и болезням, а также тем чисто человеческим ошибкам, которые иногда имеют место при выполнении работ в космосе.

Все вышесказанное позволяет заключить, что совершенствование новейшей технологии для запуска и создания условий для работы человека в космосе — задача, практически не связанная с другими важными национальными космическими программами. Можно назвать длинный перечень применений космической техники, также заслуживающих внимания. Главным среди таких применений является глобальная система спутниковой связи. Более половины всех каналов дальней связи «проходит» через спутники, и эта доля постоянно растет. Кроме того, многие внутренние каналы связи в странах, раскинувшихся на большой территории (например, Канада и Индонезия), также стали спутниковыми.

Лет 20 назад я был в числе тех, кто выражал надежду, что спутниковая связь будет использована в мировой образовательной программе, предназначенной главным образом для развивающихся стран. Мы исходим из того, что распространение хотя бы элементарной грамотности и основ арифметики принесет человечеству огромную пользу. Выведенный в 1974 г. на геостационарную орбиту спутник положил начало эксперименту по такому распространению знаний в Индии. В техническом отношении эксперимент был несомненно успешным, однако в области культуры, социологии и политики все еще остается множество нерешенных вопросов.

Дальняя связь — это единственное применение космической техники, достигшее экономической надежности в том смысле, что пользователи, нуждаясь в этой связи, без сомнений оплачивают ее полную стоимость. Та-

ким образом я провожу границу между рыночной поддержкой коммерческих услуг и поддержкой налогоплательщиками государственных услуг в интересах общества. В будущем темпы развития спутниковой связи будут определяться рыночными законами, по крайней мере в течение короткого периода, хотя когда-нибудь, конечно, возникнут технические пределы этого роста.

Согласно некоторым прогнозам, в США будет происходить постепенное включение большинства внутренних линий связи в спутниковые системы. В то же время возлагаются большие надежды на передачу информации с помощью модулированных лазерных сигналов по световодам. В США уже проложены десятки тысяч километров волоконно-оптических линий междугородной связи и в настоящее время создается волоконно-оптический кабель для трансатлантической связи. Не исключено, что в ближайшие 20 лет передача больших потоков информации между заданными точками будет осуществляться по волоконно-оптическим линиям, и это, естественно, ограничит или замедлит развитие спутниковой связи. Разумеется, волоконно-оптические линии нельзя использовать для связи с перемещающимися объектами, например с самолетами или кораблями. Все эти технические вопросы интенсивно исследуются частными корпорациями и государственными агентствами в Европе, Японии, США и, несомненно, в СССР. В этой области роль НАСА должна заключаться в проведении дальнейших исследований и в содействии развитию «гибридных» систем связи.

ДРУГОЕ важное невоенное применение космической техники — это дистанционное зондирование, к которому относится не только обычная фоторазведка (включая методы прогнозирования погоды), но также получение изображений земной поверхности и атмосферы в широком диапазоне частот. Благодаря высокому уровню развития соответствующей техники сейчас имеется возможность выбирать оптимальные диапазоны частот в радио-, инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. К примеру, два автоматических спутника «Ландсат-4» и «Ландсат-5» имеют на борту специальные приборы — тематические картографы, — составляющие карты излучения земной поверхности в нескольких диапазонах частот, представляющих интерес для геологов в их поисках залежей полезных ископаемых.

Эти применения дистанционного зондирования приносят значительные выгоды, однако они еще не прошли решающего испытания на определение их полных коммерческих возможностей. Так, программа «Ландсат» действует в рамках министерства торговли для обеспечения информацией промышленности, различных правительственных учреждений, однако она ассигнуется в основном правительством. Фактически дистанционное зондирование наравне со многими другими применениями космической техники (такими, как геодезическая съемка, воздушная и морская навигация) остается в сфере правительственных служб. Поэтому они подвергаются опасности урезания бюджета при его перераспределении в пользу программы пилотируемых космических полетов. Именно по этой причине пострадала программа «Ландсат».

В качестве оправдания создания шаттла и космической станции выдвигаются куда менее серьезные предложения. Одно из них — это обработка материалов в космосе в коммерческих масштабах. Например, широко рекламировалась возможность выращивания больших сверхчистых кристаллов или очистки фармацевтических препаратов в условиях «микрोगравитации» в космосе. Объективный анализ, проведенный Национальным исследовательским советом и другими учреждениями, не поддержал этих оптимистических предложений. Этот анализ показал, что имеющихся на сегодняшний день результатов в этой области пока недостаточно и что требуются дальнейшие исследования. Совет считает, что перспектива обработки материалов в космосе в коммерческих масштабах не выглядит достаточно убедительной, чтобы оправдать расходы на полеты в космос.

Другой столь же широко разрекламированный проект — это энергетический спутник, представляющий собой коллектор солнечной энергии площадью около 20 000 акров, который должен быть смонтирован на околоземной орбите. Микроволновые излучатели должны передавать солнечную энергию расположенным на Земле приемным станциям, с которых она будет поступать в обычные линии электропередачи. Меня радует, что голос разума восторжествовал и ныне этот проект забыт. Бывшие сенаторы Джеймс Г. Абурузк и Флорид К. Хаскелл отмечали, что стоимость такого спутника будет эквивалентна затратам на снабжение каждой семьи в США простым приемником солнечной энергии, который обеспечит ее потребности в энергии на 65%.

Два этих проекта, обработка материалов в космосе и энергетический спутник, — основные аргументы в предсказаниях исключительных темпов роста космических перевозок. Навивно было бы предполагать, что от таких проектов полностью откажутся в будущем. Однако ясно то, что ни один из них не может быть осуществлен в XX в. и отношение затрат на них к приносимой прибыли может никогда не стать меньше единицы.

ДВЕ основные культурные цели космической программы США следует рассмотреть особо. Первая из них — это порождение чувства коллективно переживаемого «приключения». Массовый интерес к реальным (в противоположность фантастическим) полетам в космос был наиболее высок во время первой посадки человека на Луну в июле 1969 г. В последние годы такая роль космических программ заметно снизилась, уступив место экранизированным небывшим, изобилующим куда более героическими подвигами. Американские зрители потратили более 200 млн. долл. на то, чтобы смотреть «Звездные войны», и сотни миллионов долларов на развитие этой темы в последовавших за тем фильмах. Общей суммы почти хватило бы на осуществление довольно крупного космического проекта. Я не собираюсь морализировать по поводу этих фактов, однако, говоря о мотивировке обоснования пилотируемых полетов в космос, их также следует принимать во внимание.

Другая культурная цель космической программы — развитие космической науки. Термин «космическая наука» можно определить как область изучения естественных явлений, которые происходят выше земной поверхности. Согласно такому определению, астрономия является древнейшей из космических наук. Многие современные исследователи определили бы космическую науку несколько иначе: как область изучения земных и внеземных явлений с помощью аппаратуры, выводимой в космос ракетами. Таким образом, космическая наука не является четко обозначенной научной дисциплиной в обычном смысле этого слова и представляет скорее совокупность методов. Лучше всего эту науку можно охарактеризовать как сложный сплав «традиционных» наук — астрономии, геологии, геофизики и океанографии.

За десятилетия, прошедшие со времени запуска первых спутников, достигнуты колоссальные успехи в исследованиях океана, атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли, раз-

личных видов солнечного излучения и его воздействия на Землю. Большой вклад внесен также в исследования Луны и планет и их эволюции. Открытия первостепенной важности обогатили звездную астрономию. Все объекты Солнечной системы, а также межпланетная среда теперь доступны для изучения с близкого расстояния. К планетам Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн были посланы зонды; некоторые из них передадут информацию об Уране и Нептуне. «Пионер-10», один из моих «любимцев», находится в полете уже около 14 лет (сейчас это самый далекий из созданных руками человека объект во Вселенной). Он все еще работает, несмотря на то что проник далеко во внешнюю гелиосферу и находится дальше от Солнца, чем Плутон. Несколько месяцев назад спутник «International Comet Explorer» пролетел через кому кометы Джакобини—Циннера, а в январе 1986 г. «Вояджер-2» первым среди всех космических аппаратов «встретился» с Ураном.

Ученые имеют в своем распоряжении множество превосходных приборов, способных выдерживать большие стартовые перегрузки, а сами научные исследования обещают новые открытия. В настоящее время успешно осуществляются полеты спутников «International Ultraviolet Explorer», «Dynamics Explorer», «International Sun — Earth Explorer», а также космических аппаратов «Пионер» и «Вояджер». В то же время в 80-х годах количество новых проектов заметно сократилось; от некоторых из них пришлось совсем отказаться, а реализация других была отложена на длительное время.

В ПОСЛЕДНИЕ годы основной упор в космических исследованиях делался на дорогостоящие программы, предусматривавшие, например, вывод в космос космического телескопа, полет «Галилео» к Юпитеру, посадку «Викингов» на Марс и запуск двух зондов «Вояджер». Этой тенденцией также отчасти объясняется уменьшение количества научной аппаратуры, выносимой в космос. В самом деле, за период с 1983 по 1988 г. в США планировалось запустить лишь два крупных научных космических аппарата — космический телескоп и «Галилео». Подобные программы отражают тенденцию к возрастанию сложности космических полетов и, несомненно, имеют большие достоинства. К сожалению, они, так же как и крупные программы пилотируемых полетов, способствуют вытеснению более гибких и значительно более дешевых программ, которые всегда

оказывались весьма продуктивными. Малые программы внесли большой вклад в космическую науку и могли бы сыграть важную роль в космической программе США, однако сейчас они практически исчезли.

В то же время Европейское космическое агентство, Япония и СССР продолжают успешно реализовывать важные научные космические программы. В том, что США все больше теряют лидерство в области космических исследований, повинны, помимо, в основном чрезмерная заинтересованность в пилотируемых полетах и преследование каких-то туманных и неясных целей в высшей степени спекулятивного характера. В том случае, если бюджетный «климат» и отношение к невоенным программам пилотируемых космических полетов останутся неизменными, создание космической станции отрицательно скажется на развитии космической науки и на важных применениях космической техники.

КОММЕНТАРИЙ. Статья Дж. ван Аллена, опубликованная в "Scientific American" в январе 1986 г., свидетельствует о неутраченной дискуссии в научных кругах США о выборе пропорций между пилотируемой космонавтикой и подходом, основанном на беспилотных космических аппаратах. Совсем не случайно пристальное внимание, проявляемое к советской космической программе, вот уже четверть века столь успешно сочетающей пилотируемые полеты с работой обширной сети автоматических космических аппаратов. Безусловно, подавляющая часть крупных открытий дискоссии эры сделана с помощью научных приборов, установленных именно на беспилотных кораблях и спутниках. К их числу с полным правом можно отнести замечательные исследования самого автора статьи, подарившего науке радиационные пояса ван Аллена, образуемые заряженными частицами высокой энергии в магнитном поле Земли.

Недавняя трагедия «Челленджера» с новой остротой поставила на повестку дня вопросы обеспечения безопасности полетов космонавтов и дальнейшее развитие программы «Спейс шаттл».

Сколь бы ни был важен разумный баланс между различными направлениями в космонавтике, неизмеримо большее значение имеет исторический выбор, который предстоит сделать человечеству: мирный космос или «звездные войны». В этом коренном вопросе позиция автора статьи, выдающегося американского физика, не оставляет никаких сомнений.

Директор
Института космических
исследований АН СССР
академик Р. З. Сагдеев

Перекроите все иначе

С ПОМОЩЬЮ нового композиционного материала, сочетающего в себе биологическую часть и металл, удастся так направить процесс фотосинтеза, что вместо углеводов образуется водород. Эта реакция, совершенно не свойственная естественному фотосинтетическому пути, может оказаться перспективной в свете поисков замены ископаемому горючему.

Биологическая часть этого композиционного материала представлена тилакоидной мембраной хлоропластов, способной улавливать энергию солнечных лучей и использовать ее для фотосинтеза. В качестве металлического компонента выступает платина. Создатель нового материала — сотрудник Окриджской национальной лаборатории Э. Гринбом — описывает свою работу как «перекраивание» функционально активных комплексов из растений для нужд человека.

В материале, полученном Гринбомом, сохраняется неизменной первая стадия фотосинтеза, на которой непосредственно утилизируется энергия света. На этом этапе за счет энергии фотона в фотосистеме I, являющейся частью тилакоидной мембраны, высвобождается электрон. Он передается по цепочке молекул внутри мембраны и затем принимает участие в восстановлении (под восстановлением понимается присоединение электрона) переносчика электронов $NADP^+$ (никотинамидадениндинуклеотидфосфата), который превращается в $NADPH$. Следующая стадия фотосинтетического процесса тоже остается ненарушенной. На этой стадии энергия фотона используется фотосистемой II, также являющейся частью тилакоидной мембраны, которая отнимает электрон у молекулы воды и переносит его в фотосистему I, подготавливая тем самым мембрану к очередному циклу.

При естественном фотосинтезе $NADPH$ запускает так называемые темновые, т. е. происходящие без прямого участия света, реакции, в результате которых атом углерода из CO_2 включается в углеводы, главным образом в гексозы (сахара, содержащие по 6 атомов углерода), в частности в глюкозу. В композиционном материале Гринбома светозависимые и темновые реакции фотосинтеза разобщены. Гринбому удалось осадить платину на тилакоидных мембранах в тех местах, где происходит присоединение электрона к $NADP^+$. И электрон присоединяется не к $NADP^+$, а к

платине, которая в восстановленном состоянии катализирует химические процессы, принципиально отличные от темновых реакций нормального фотосинтеза. В итоге светозависимых реакций фотосинтеза молекула воды теряет электроны и из нее образуются атом кислорода и два протона, представляющие собой атомы водорода, лишенные своих электронов. Реакция, катализируемая платиной, заключается в восстановлении водорода из этих протонов и электронов. Таким образом, в платинированных хлоропластах за счет энергии света вода расщепляется на молекулярный кислород и водород.

Создание композиционного материала началось с того, что из листьев шпината извлекали хлоропласты и разрушали их, так что становились доступными тилакоидные мембраны. К суспензии тилакоидных мембран приливали раствор, содержащий ионы платины. В присутствии восстанавливающего агента (донора электронов), которым обычно служил молекулярный водород, металлическая платина осаждалась из раствора на фрагменты мембран. Такой препарат, нанесенный на фильтровальную бумагу, в ответ на освещение разлагал воду на водород и кислород.

Для получения фотосинтетической активности эффективен раствор, содержащий ионы гексахлорплатины, а тетрааминоплатина оказалась неэффективной. Гринбом предполагает, что в данном случае основную роль играет притягивание разноименных зарядов: ион гексахлорплатины, в котором атом платины окружен шестью атомами хлора, имеет заряд -2 , а ион тетрааминоплатины несет заряд $+2$. По-видимому, восстанавливающий участок фотосистемы I (тот участок тилакоидной мембраны, в котором происходит присоединение электрона к $NADP^+$), заряжен положительно. В следующем эксперименте Гринбом отказался от добавления восстанавливающего агента к раствору платины, а воспользовался восстанавливающими свойствами участка фотосистемы I. При освещении мембран на этом участке появлялись свободные электроны, что приводило к осаждению платины. Получаемый таким образом препарат тоже был способен к фотосинтезу молекулярного водорода.

Преимущества новой технологии очевидны: сырьем для получения горючего служит вода и вода же образуется при его сгорании.

Остановка злокачественного роста путем принудительной дифференцировки клеток

Размножение лейкоцитов и их дифференцировка в неделящиеся формы регулируются специфическими белками.

Лейкемические клетки также можно принудить к дифференцировке; это открывает новые возможности для лечения рака

ЛЕО САКС

КЛЕТКИ тела происходят из предшественников, называемых стволовыми клетками. Стволовые клетки могут быстро делиться, но их потомки, превратившись в результате созревания и дифференцировки в специализированные формы, обычно прекращают деление. В ходе нормального роста, развития и всей дальнейшей жизни организма процессы размножения и дифференцировки находятся в гармонии: размножение стволовых клеток обеспечивает образование и рост новых тканей и восполнение отмерших клеток, при этом прекращение деления клеток после достижения ими конечной стадии своего развития держит их размножение под контролем. При раке эта гармония разрушается: появляется слишком много незрелых размножающихся клеток.

Поняв, как происходят процессы размножения и дифференцировки нормальных клеток, можно ответить на ряд вопросов о природе злокачественного роста. Все ли клеточные механизмы, контролирующие деление и дифференцировку, полностью выходят из строя в раковых клетках или же некоторые из них еще функционируют? Если некоторые из механизмов остаются ненарушенными, то нельзя ли их снова привести в действие, чтобы заставить раковые клетки дифференцироваться и прекратить размножаться. Я установил, что злокачественные клетки могут сохранять генетически детерминированные потенции к дифференцировке. Если их стимулировать соответствующим образом, то они пройдут до конца свой нормальный путь развития, т.е. размножатся, дифференцируются и перестанут делиться. Это открывает новые возможности для лечения рака.

Я изучал процессы размножения и дифференцировки нормальных и лейкемических клеток крови. В ходе гемопоэза (кровотворения) клетки-предшественники одного определенного типа, а именно полипотентные стволовые клетки костного мозга дают начало ряду более специализированных типов клеток-предшественников, в том числе лимфоидным стволовым клеткам, являющимся предшественниками Т- и В-лимфоцитов, и миелоидным стволовым клеткам, являющимся предшественниками клеток миелоидного ряда — макрофагов, гранулоцитов, эритроцитов, мегакариоцитов. Эти клетки в свою очередь созревают и дифференцируются в красные (эритроциты) и во всевозможные белые (лейкоциты) клетки крови. В качестве модельной системы для исследований я избрал стволовые клетки миелоидного ряда, зрелые лейкоциты, происходящие от этих стволовых клеток, а также лейкемические миелоидные клетки. Миелоидные лейкемические клетки как бы заморожены на одной из стадий своего развития. Обычно они не дифференцируются в зрелые клетки и продолжают делиться.

Стремясь установить основные принципы, управляющие размножением клеток и их дифференцировкой, а также найти возможности обращать злокачественное развитие, я разработал систему культивирования, в которой все эти процессы можно наблюдать *in vitro*. В 1963 г. в Вейцмановском институте в Израиле Х. Гинзбург и я обнаружили, что если поместить нормальные предшественники клеток крови в жидкую среду, содержащую фибробласты (клетки соединительной ткани), то они начинают делиться, образуют колонии и

дифференцируются. В 1965 г. Д. Плужник и я показали, что колонии также развиваются и дифференцируются в полужидкой среде, содержащей агар. (Агаровый гель препятствует движению клеток, что облегчает изучение отдельных колоний. Колония, выросшая из одной клетки, представляет собой клон — совокупность генетически идентичных клеток, являющихся потомками одной и той же клетки.) В 1966 г. сотрудники Мельбурнского университета и Института медицинских исследований Уолтера и Элизы Холл в Мельбурне Т. Брэдли и Д. Меткаф также клонировали клетки-предшественники в агаре. Первыми нормальными клетками, для которых удалось применить этот метод, были предшественники миелоидных клеток, из которых образуются макрофаги и гранулоциты.

Макрофаги и гранулоциты — это фагоцитирующие клетки; они захватывают и ликвидируют чужеродные частицы, включая вторгшихся в организм микробов. Кроме того, макрофаги «представляют» молекулы поглощенных чужеродных антигенов на своей клеточной мембране, где эти антигены узнаются лейкоцитами других видов, которые затем осуществляют иммунный ответ. Дж. Тилл и Э. Мак-Каллок из Онкологического центра пров. Онтарио показали, что в организме макрофаги и гранулоциты развиваются из общего предшественника — стволовых клеток, дающих начало клеткам миелоидного ряда. Таким образом, в полученной нами культуре клетки-предшественники проходили тот же путь развития, что и в организме.

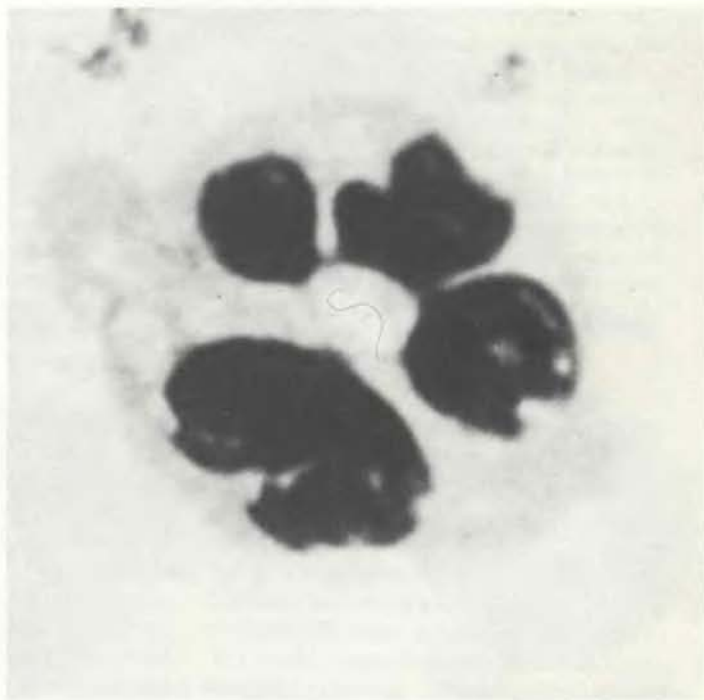
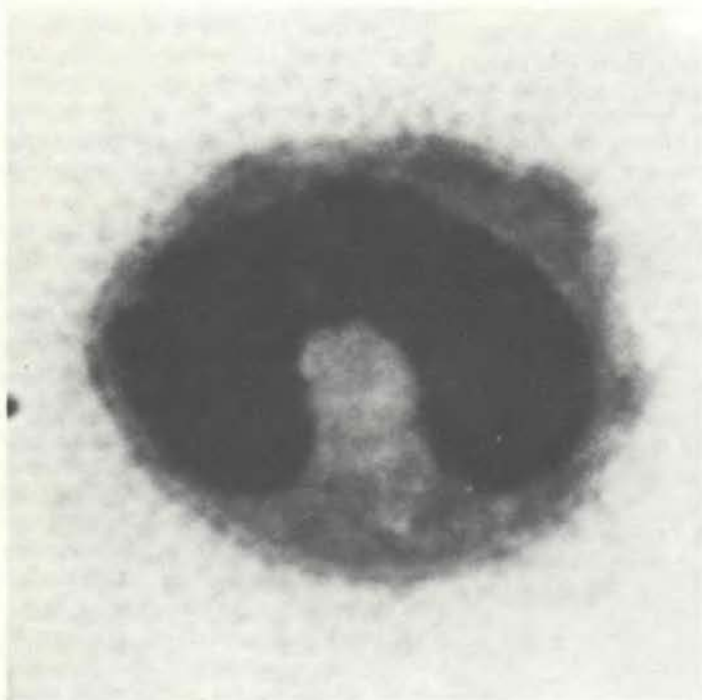
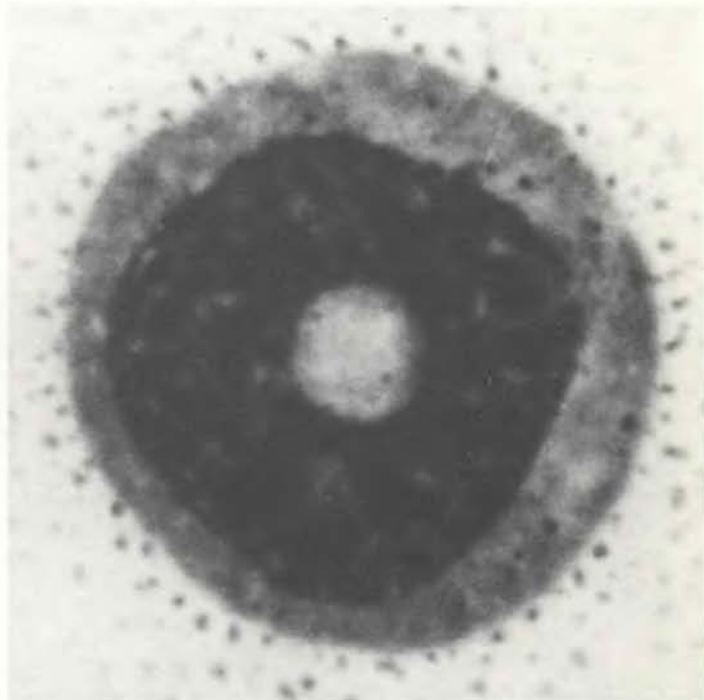
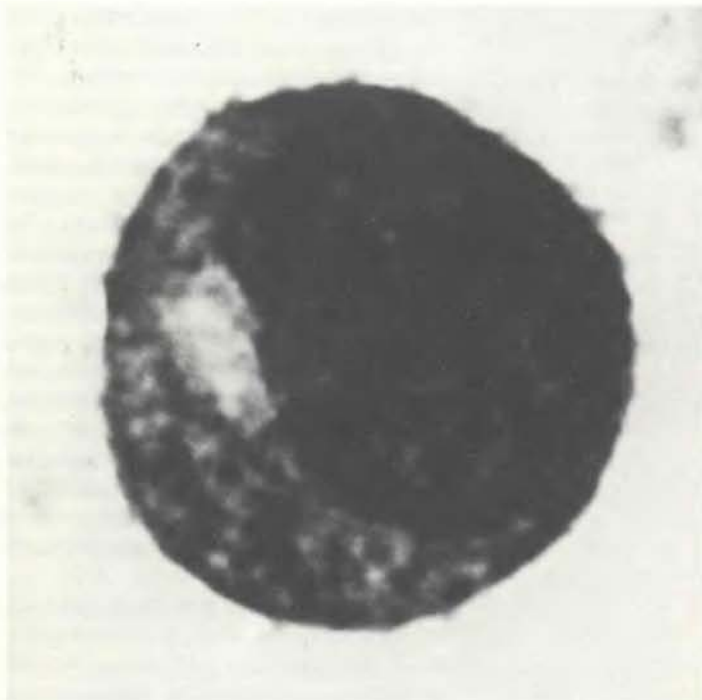
Какова же роль фибробластов, которые должны присутствовать в культуре клеток в качестве «питаю-

шего слоя», чтобы предшественники миелоидных клеток могли размножаться и дифференцироваться? В 1965 г. я обнаружил, что клетки питающего слоя секретируют вещества, индуцирующие деление и дифференцировку. В следующем году Д. Плужник, Я. Итикава и я установили, что вещества-индукторы в регистрируемых количествах присутствуют в культуральной среде, причем на клет-

ки разных типов действовали, по-видимому, разные индукторы. Мы очистили эти вещества, и оказалось, что они представляют собой белки либо гликопротеины (т.е. белки, к полипептидной цепи которых присоединены сахара), хотя наличие остатков сахаров, судя по всему, не существенно для активности индуктора. Используя такую же систему культивирования клеток, другие исследовате-

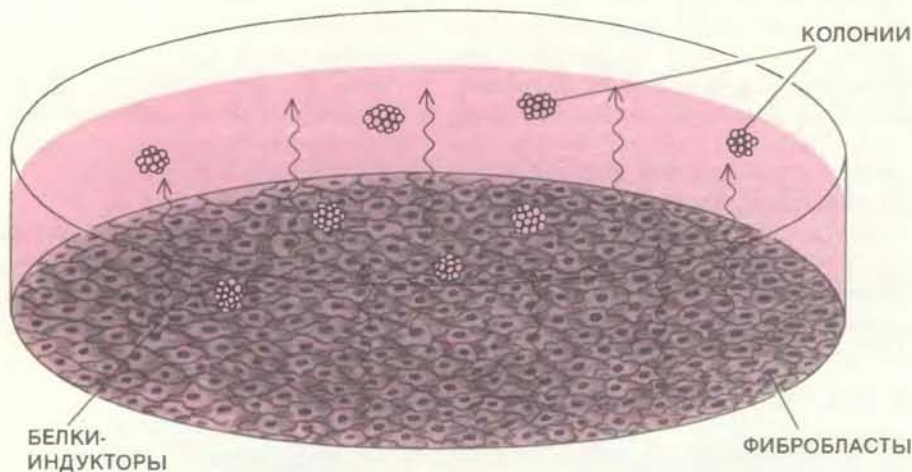
ли выделили белки-индукторы для многих типов клеток крови, в том числе для различных лимфоцитов. Разнообразные клетки способны секретировать белки-индукторы как в культуре, так и в организме.

ДЛЯ того, чтобы образовалась колония макрофагов или гранулоцитов, клетки-предшественники должны вначале делиться, а затем диф-

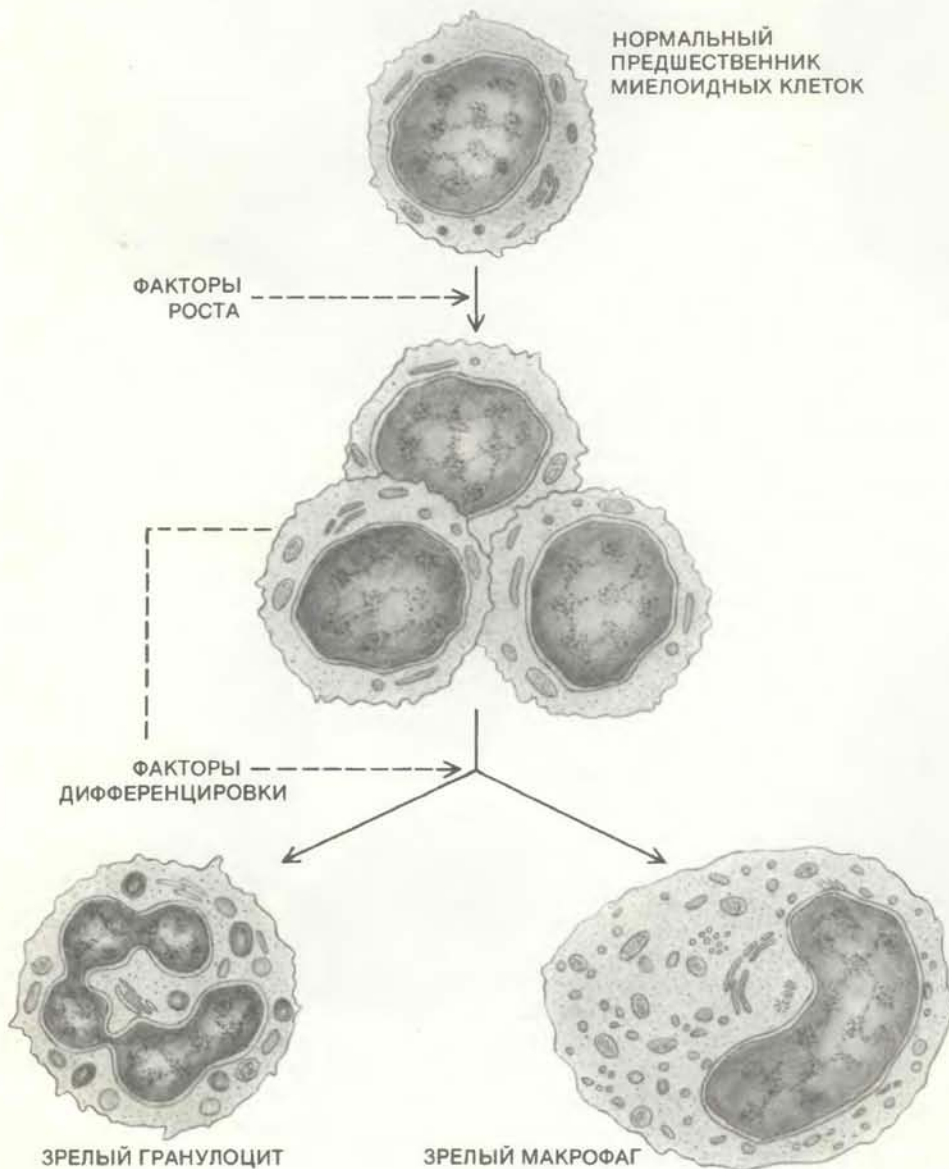


ПРЕВРАЩЕНИЕ ЛЕЙКЕМИЧЕСКОЙ МИЕЛОИДНОЙ КЛЕТКИ из недифференцированной быстро размножающейся формы (*слева вверху*) в зрелый неделящийся гранулоцит (*справа внизу*). Нормальные предшественники миелоидных клеток (один из видов незрелых, недифференцированных лейкоцитов) проходят через показанные здесь ста-

дии в процессе созревания, в результате которого развиваются гранулоциты. Обычно лейкемические клетки не дифференцируются, но если их инкубировать с белком — фактором дифференцировки, который производят нормальные клетки, то они достигают зрелости и прекращают делиться, т.е. перестают быть злокачественными.



СИСТЕМА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ для наблюдения за размножением и дифференцировкой миелоидных клеток. Когда в культуре этих клеток присутствует слой фибробластов (клеток соединительной ткани), они делятся, образуя колонии, и дифференцируются в зрелые формы — макрофаги или гранулоциты. Анализ культуральной среды показал, что фибробласты секретируют белки, необходимые для деления и дифференцировки миелоидных клеток.



СВЯЗЬ МЕЖДУ РАЗМНОЖЕНИЕМ И ДИФФЕРЕНЦИРОВКОЙ в миелоидных клетках осуществляется через регуляторные белки. Факторы роста из внешнего источника вызывают деление клеток-предшественников, а также индуцируют в них синтез факторов дифференцировки. В конце концов количество факторов дифференцировки достигает уровня, достаточного для превращения клеток в зрелые формы. Деление тогда прекращается.

ференцироваться. Казалось вероятным, что каждый из этих процессов индуцируется специализированным белком. Э. Фибак и я обнаружили, что зрелые гранулоциты в культуре секретируют белок, который индуцирует дифференцировку предшественников миелоидных клеток, но не вызывает их деления и образования колоний. Дж. Лотом и я брали из культур клеток различных типов культуральную жидкость и проверяли, способна ли она вызывать деление и дифференцировку предшественников миелоидных клеток. Выяснилось, что эти два процесса действительно индуцируются разными факторами. Индукторы роста в отличие от индукторов дифференцировки не вызывают созревания предшественников, но абсолютно необходимы для деления клеток и их жизнеспособности; без индукторов роста клетки-предшественники гибнут. Данные о различной природе двух факторов подтвердились также в работах других исследователей: Я. Итикава из Института легочных заболеваний (Япония), М. Ходзуми из Научно-исследовательского института Онкологического центра Саитама, И. Олссон из Лундской больницы (Швеция) и Р. Галло из Национального института рака (США).

Эти два вида индукторов действуют на клетку, видимо, разными путями. Г. Вейсингер и я обнаружили, что индуктор дифференцировки может непосредственно связываться с ДНК клеток-предшественников; вероятно, он активирует гены, которые должны экспрессироваться по мере созревания клеток. Индуктор роста, напротив, не связывается с ДНК; он стимулирует деление клеток-предшественников каким-то другим образом.

Сейчас ясно, что каждый из факторов представляет собой совокупность нескольких белков. Работы, выполненные в моей лаборатории, а также другими исследователями, среди которых Д. Меткаф и Э. Бердженс из Института медицинских исследований Уолтера и Элизы Холл, Р. Стэнли из Медицинского колледжа им. Альберта Эйнштейна, Дж. Ил из Фредериковской организации по содействию онкологическим исследованиям в Мэрилэнде и Т. Декстер из Манчестерского университета королевы Виктории, показали, что только для предшественников миелоидных клеток существуют четыре различных белковых индуктора роста. Каждый из них действует на миелоидные клетки-предшественники, имеющие в ходе развития свою судьбу.

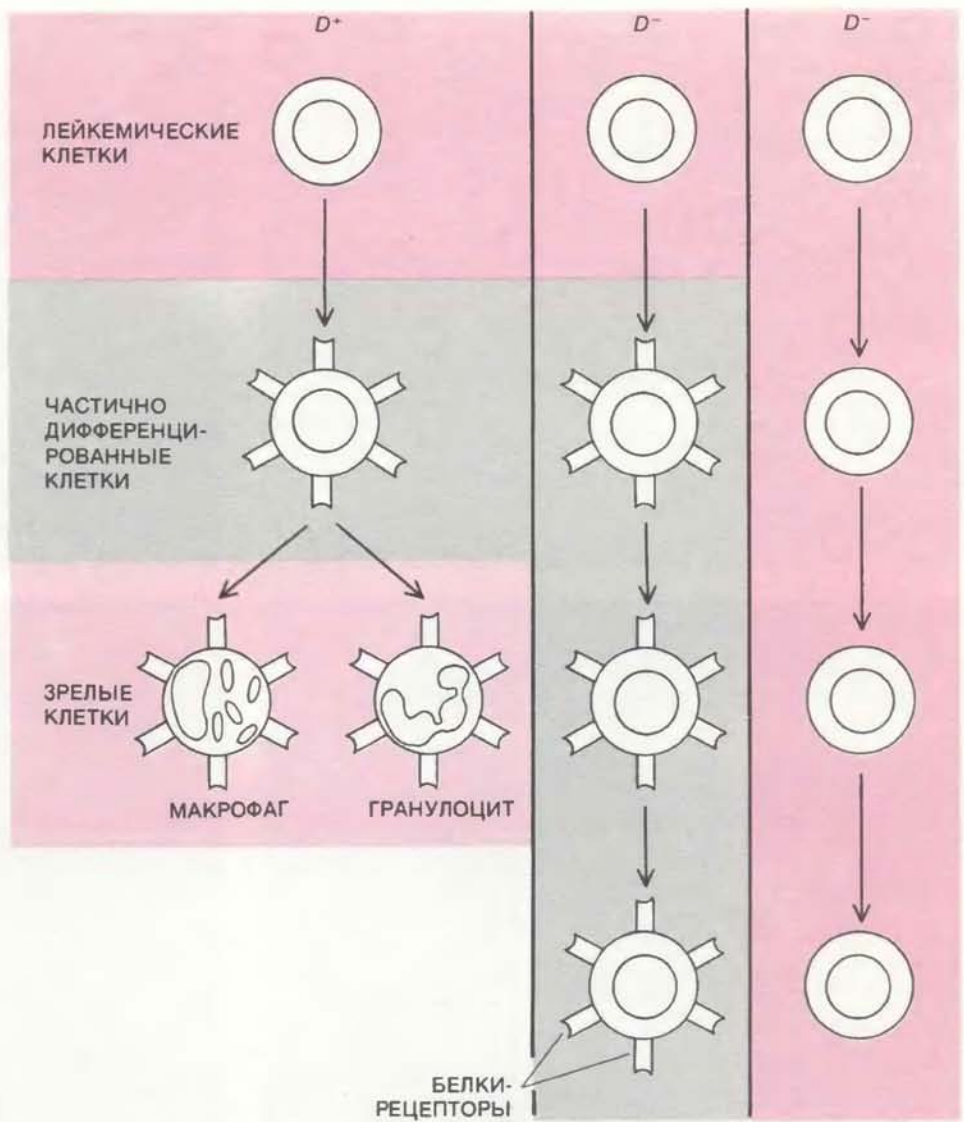
Один белок-индуктор стимулирует деление миелоидных стволовых кле-

ток, из которых позже развивается целый спектр различных клеток: макрофаги, эритроциты, мегакариоциты (предшественники тромбоцитов), а также гранулоциты, в том числе эозинофилы, и тучные клетки (эти два последних вида клеток принимают участие в воспалительном процессе). Другой белок действует на предшественники миелоидных клеток с более ограниченными «перспективами», превращающиеся в макрофаги и гранулоциты. Третий действует только на предшественники макрофагов, четвертый — на предшественники гранулоцитов. Таким образом, индукторы роста создают иерархию специфичности: по мере того как миелоидная клетка созревает и пути ее развития ограничиваются, на нее действуют различные индукторы роста. Во многих лабораториях были клонированы фрагменты ДНК, обеспечивающие синтез этих белков. Было показано, что каждый из белков — индукторов роста, действующих на клетки-предшественники миелоидного ряда, кодируется отдельным геном.

Индукторов дифференцировки в свою очередь, вероятно, существует столько же, сколько имеется типов клеток, созревание которых они вызывают. Клонирование соответствующих ДНК должно дать информацию об организации генов, кодирующих эти белки.

Индукторы роста и дифференцировки получили множество имен. Как общий термин, обозначающий все индукторы роста, я вначале использовал *mashran gm*, от древнееврейского *sharo*, что значит «посылать вперед», и первых букв *g* и *m*, обозначающих гранулоциты и макрофаги. Позже были приняты другие термины, такие, как «колониестимулирующие факторы» для всех белков, MGI-1 (macrophage and granulocyte inducers type I) для факторов роста и MGI-2 для факторов дифференцировки.

В нормальных клетках действие факторов роста и дифференцировки тонко скоординировано. Лотем и я обнаружили, что если нормальные предшественники миелоидных клеток инкубировать вместе с фактором роста, выделенным из культуры клеток другого типа, то предшественники делятся и затем дифференцируются, даже если к ним не добавляли фактор дифференцировки. Выяснилось, что источником индуктора дифференцировки являются сами миелоидные клетки. Фактор роста, следовательно, оказывает двойное действие: он вызывает и размножение клеток-предшественников, и образование в них фактора дифференцировки. Когда популяция клеток-предшественников



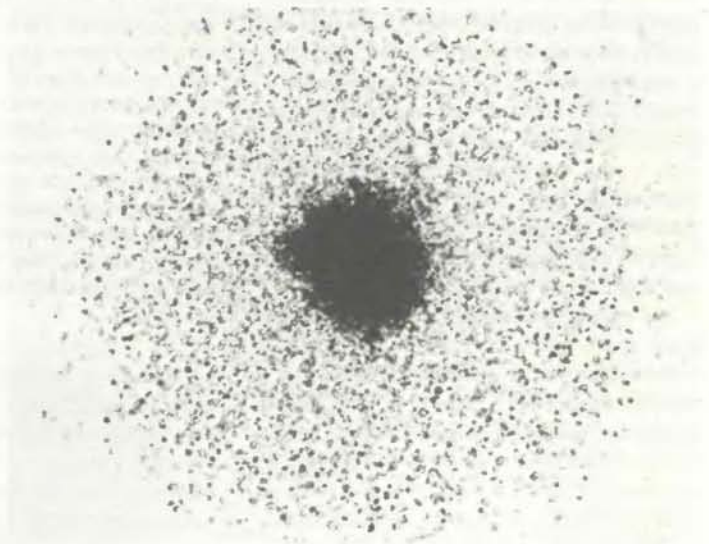
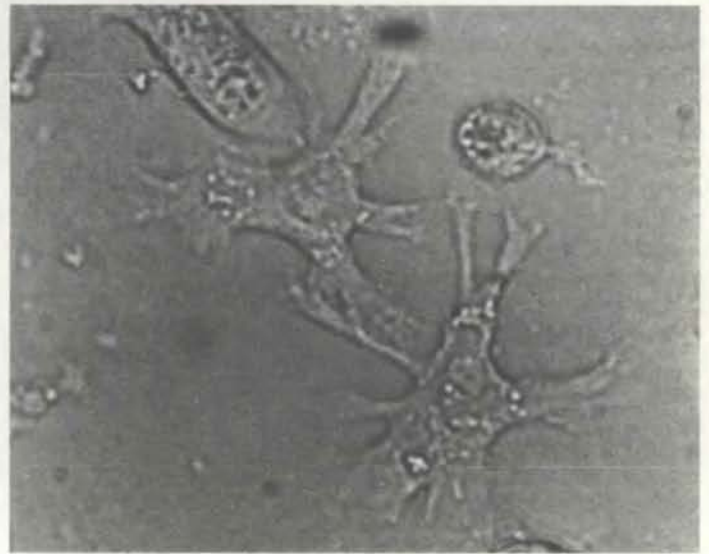
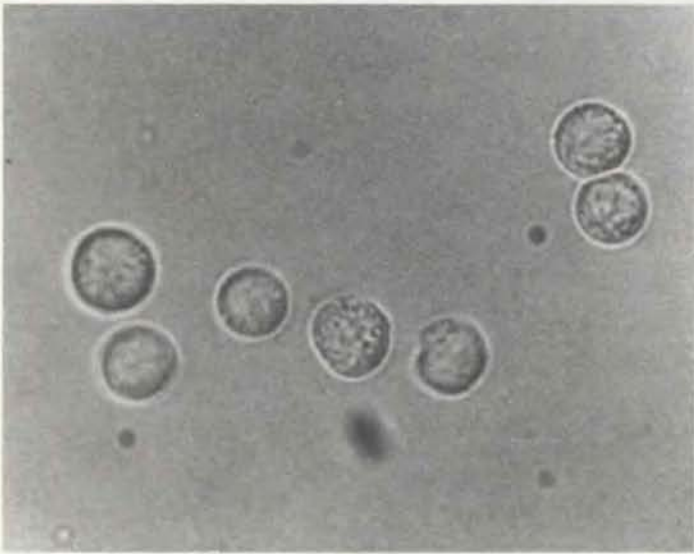
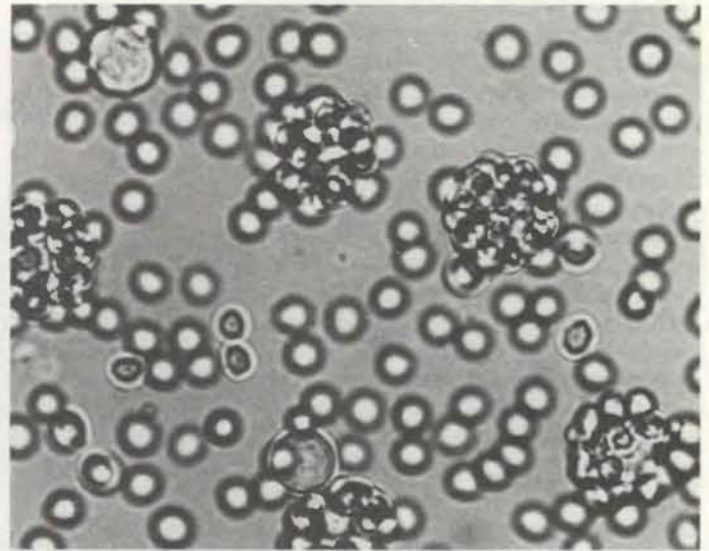
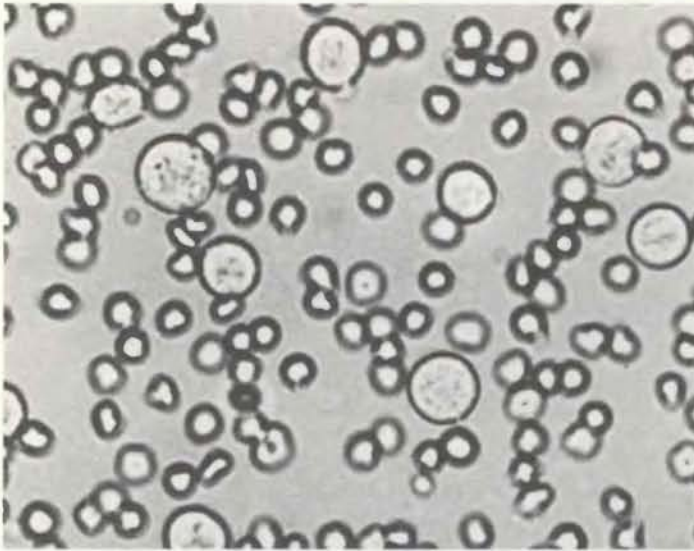
ОТВЕТ НА ФАКТОРЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВКИ в разных клонах лейкемических клеток различен. Некоторые клоны способны к дифференцировке (D^+). Добавление факторов дифференцировки, выделенных из культур нормальных клеток, побуждает клетки таких клонов к нормальному развитию. Вначале они достигают промежуточной стадии, когда их поверхностная мембрана покрывается рецепторными белками, характерными для зрелых клеток. Затем они становятся полностью зрелыми, не делящимися макрофагами или гранулоцитами. Клоны, неспособные к окончательной дифференцировке (D^-), в присутствии факторов дифференцировки либо развиваются до промежуточной стадии, на которой их размножение только замедляется (в середине), либо оказываются совершенно нечувствительными и продолжают делиться, как прежде. Однако существуют вещества, заставляющие дифференцироваться и клетки D^- .

становится достаточно многочисленной, совместное производство ими фактора дифференцировки достигает уровня, необходимого, чтобы вызвать их дифференцировку. Эту нормальную связь между делением и дифференцировкой можно, однако, «закоротить» с помощью веществ, заставляющих другие клетки синтезировать и секретировать фактор дифференцировки.

Продукция фактора дифференцировки в ходе размножения у одних клеток-предшественников может начинаться позже, чем у других, и популяция этих клеток успевает стать более многочисленной прежде, чем про-

изойдет их дифференцировка. Возможно, что каждый специфический фактор роста индуцирует образование определенного специфического фактора дифференцировки и в результате созревают клетки только определенного сорта. Таким образом можно объяснить, почему каждый из четырех «миелоидных» факторов роста связан со своим набором зрелых клеток. Другое объяснение состоит в том, что разные факторы роста действуют на разных стадиях развития клетки.

Помимо того, что в норме клеточный рост сопряжен с дифференцировкой, в клетках крови и других тканей



ПРИЗНАКИ ЗРЕЛОСТИ в лейкоцитарных клетках, принужденных к дифференцировке. Для зрелых лейкоцитов характерно наличие на поверхности определенных белковых рецепторов. Один из способов их обнаружения — смешение клеток с эритроцитами барана. Эритроциты собираются на поверхности зрелых клеток, формируя «розетки». С лейкоцитарными миелоидными клетками бараньи эритроциты не связываются (более крупные клетки на снимке *вверху слева*), но на лейкоцитарных клетках, подвергнутых действию индуктора дифференцировки, розетки образуются (*вверху справа*). Помещенные на плоскую поверхность, лейкоцитарные клетки обычно остаются круглыми и

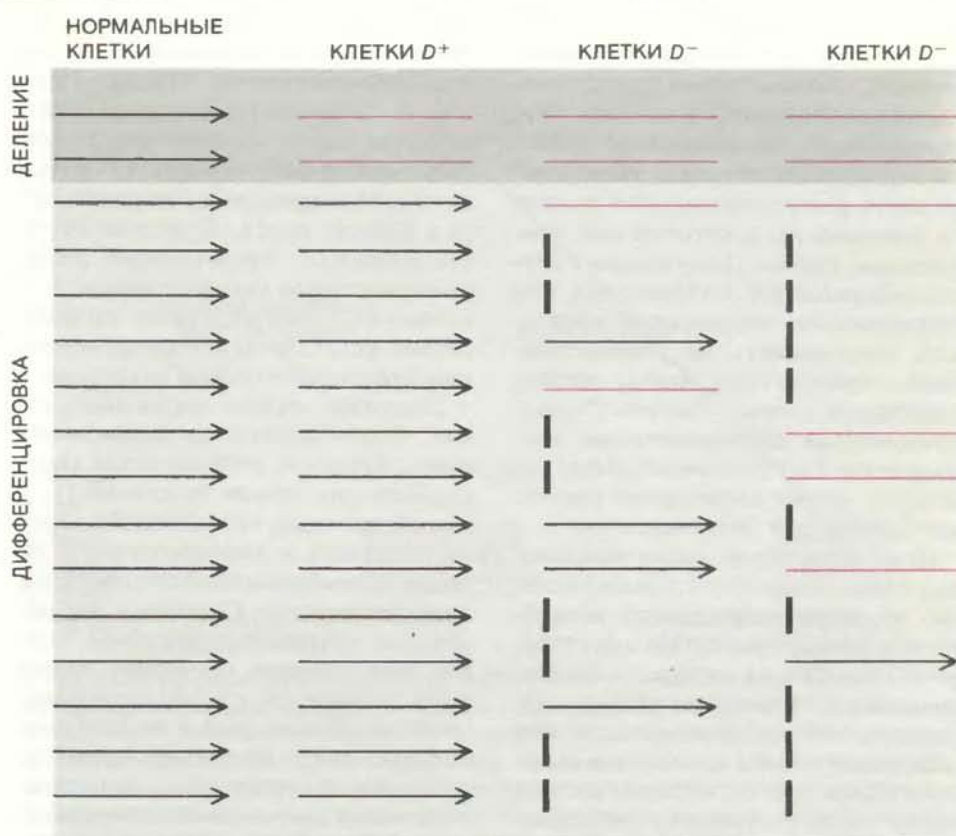
не прикрепляются к ней (*посередине слева*). После того как под воздействием специфического фактора такие клетки дифференцируются и превращаются в макрофаги, они, как обычные макрофаги, расплываются на поверхности и двигаются по ней (*посередине справа*). Зрелые макрофаги и гранулоциты способны к хемотаксису. Клон лейкоцитарных клеток, подвергнутый химическому раздражению, остается компактным, потому что клетки неподвижны (*внизу слева*), а клон дифференцированных клеток в присутствии того же вещества «размывается» по краям, так как клетки расплываются (*внизу справа*).

существует еще одна связь: между дифференцировкой и прекращением деления. Почему клетки, достигнув зрелости, перестают делиться? Эритроциты у человека и других млекопитающих в процессе созревания лишаются ядра и поэтому теряют способность к делению. Другие зрелые клетки сохраняют свои ядра, но все равно не делятся; предполагается, что такие клетки, достигшие конечной стадии дифференцировки, производят вещества, ингибирующие их размножение.

ПРИ лейкемии миелоидные клетки выходят из-под контроля механизмов, управляющих их размножением. В нормальном состоянии размножение клеток ограничено прежде всего количеством фактора роста. Нормальные предшественники миелоидных клеток должны зависеть от других клеток, производящих этот фактор, и его поступление может быть нерегулярным. Например, при инфекции фибробласты и ряд других клеток секретируют фактор роста в больших количествах, что ведет к увеличению популяции лейкоцитов в организме, а в обычное время уровень этого фактора в крови падает. Означает ли непрерывное размножение лейкемических клеток, что они не испытывают нужду в факторе роста?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужны были линии злокачественных клеток, растущие в культуре и не загрязненные нормальными клетками. В моей и ряде других лабораторий удалось получить несколько таких линий лейкемических миелоидных клеток. При изучении этих линий обнаружилось, что клетки уходили из-под контроля, обусловленного поступлением фактора роста, двумя способами. Клетки некоторых линий просто нуждались в меньшем, чем нормальные клетки, количестве фактора роста; причем потребность в нем уменьшалась по мере того, как клетки росли в культуре. В конце концов необходимость в индукторе совсем исчезала. Клетки других линий производили свой собственный фактор роста.

И в том и в другом случае клетки становились способными к непрерывному размножению в отличие от нормальных клеток. Такие изменения в характере клеточного роста объясняют, почему раковые клетки могут образовывать метастазы там, где отсутствуют факторы роста, нужные для размножения их нормальных «двойников». И напротив, тот факт, что клетки некоторых видов дают метастазы только в определенных органах, возможно, указывает, что они все же нуждаются в поступлении извне небольших количеств фактора



НАБОРЫ БЕЛКОВ, синтезируемых в нормальных клетках, в лейкемических клетках, способных (D^+) и неспособных (D^-) к дифференцировке, различны. Нормальные миелоидные клетки под действием факторов роста и дифференцировки претерпевают ряд изменений (обозначены стрелками): синтез одних белков начинается, а других — прекращается. В лейкемических клетках те изменения, которые должен вызывать фактор роста, являются конститутивными, т. е. они уже произошли (обозначено цветом). Этим можно объяснить, почему такие клетки размножаются и без фактора роста. В клетках D^+ сохранилась способность к переключению синтеза белков под действием фактора дифференцировки. В клетках D^- многие необходимые изменения либо конститутивны, либо вообще не могут происходить (обозначено вертикальными черточками). Чем менее чувствителен клон к факторам дифференцировки, тем больше в нем конститутивных изменений. Для нормальной дифференцировки, видимо, требуется, чтобы определенные переключения в синтезе белков происходили синхронно. Конститутивные изменения нарушают синхронность, и клетки D^- не реагируют на факторы дифференцировки.

роста, который вырабатывается в этих органах.

Чтобы клетки стали злокачественными, они должны также утратить второе свойство нормальных клеток, ограничивающее их размножение, а именно связь между делением и дифференцировкой. В здоровой ткани четко регулируется соотношение покоящихся и размножающихся клеток. Если бы фактор роста вызывал синтез фактора дифференцировки в лейкемических клетках, то тогда злокачественные клетки, получающие фактор роста или сами производящие его, дифференцировались бы и их размножение прекращалось. Мы добавляли очищенный фактор роста к культуре лейкемических клеток, растущих без фактора роста, и обнаружили, что он не вызывал образования фактора дифференцировки. Следовательно, развитие лейкемии отражает два круга генетических изменений в предшественниках миелоидных клеток: во-первых, уменьшается или исчезает

потребность в поступлении фактора роста извне, и, во-вторых, разрывается связь между делением клеток и их дифференцировкой.

ХОТЯ лейкемические клетки в организме обычно не продуцируют фактор дифференцировки, нас интересовало, можно ли с помощью фактора дифференцировки, поступающего извне, искусственно заставить клетки созреть и прекращать деление. Среди имевшихся у нас клонов лейкемических миелоидных клеток некоторые действительно дифференцировались, если их инкубировали с нормальным фактором дифференцировки. Подвергшиеся индукции и вставшие на путь дифференцировки клетки приобретали характерные черты зрелых макрофагов или гранулоцитов. У них на клеточной мембране появлялись такие же белки-рецепторы, как на зрелых нормальных клетках, и они становились способными двигаться в направлении опреде-

ленных химических стимулов, что свойственно незлокачественным клеткам. Лейкемические клетки, которые инкубировали с фактором дифференцировки, вызывающим развитие макрофагов, обрели также способность распространяться и ползти по поверхности, к которой они прикреплены. Данные, полученные в других лабораториях, подтвердили, что лейкемические миелоидные клетки, если индуцировать их дифференцировку, приобретают черты зрелых макрофагов и гранулоцитов. У подвергнувшихся дифференцировке лейкемических клеток появляется еще одна черта зрелых нормальных клеток: они прекращают делиться.

Итак, некоторые линии миелоидных клеток становятся лейкемическими, утрачивая нормальную потребность в факторе роста. Но они сохраняют способность следовать по нормальному пути развития и могут дифференцироваться в макрофаги или гранулоциты. Мои коллеги и я выделили клоны клеток, которые в отличие от таких способных к дифференцировке клонов (D^+) были дефектны (D^-) в этом отношении. Фактор дифференцировки побуждал некоторые из них достигать промежуточной стадии развития; размножение клеток на

этой стадии замедлено. Другие же не могли дифференцироваться даже до этой промежуточной стадии. Признак D^- встречается как среди лейкемических клеток, производящих свой собственный фактор роста, так и среди тех, которые вообще не нуждаются в факторе роста. Я предположил, что клоны D^+ представляют собой раннюю стадию злокачественности, а клоны D^- соответствуют поздней стадии, когда геном клеток претерпел уже более существенные изменения.

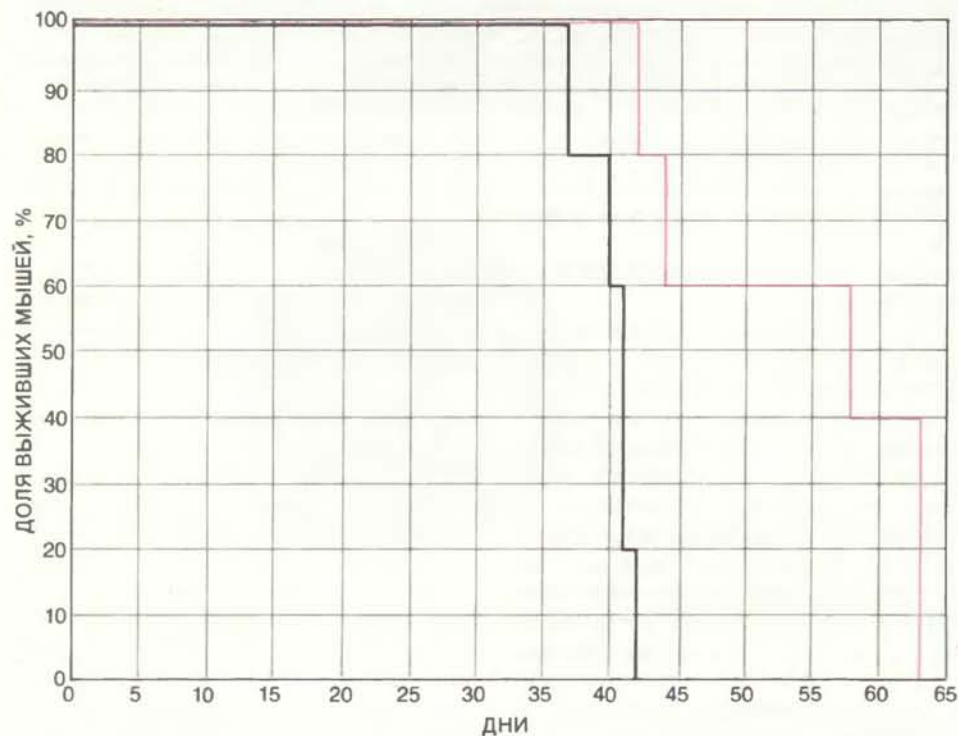
Возникает вопрос: какую часть генов, ответственных за дифференцировку, утратили лейкемические клетки, если они дошли до стадии D^- ? Мы обнаружили, что клетки D^+ можно принудить к дифференцировке не только с помощью обычного фактора дифференцировки. Оказалось, что некоторые стероидные гормоны, слабое рентгеновское излучение, малые дозы препаратов, обычно используемых для лечения рака в значительно больших дозах (например, цитозин-арабинозид, адриамицин, метотрексат), могут индуцировать созревание лейкемических клеток D^+ . Среди вызывающих дифференцировку веществ иной природы — инсулин, некоторые витамины, бактериальные липополисахариды (компоненты клеточной

стенки бактерий), а также ряд соединений растительного происхождения, например лектины и форболовые эфиры.

Если добавлять такие вещества по отдельности, в различных сочетаниях или в комбинации с нормальным фактором дифференцировки, то они могут индуцировать дифференцировку и клонов D^- , хотя эффективность конкретного препарата варьирует от клона к клону. Эти данные свидетельствуют о том, что в клонах D^- сохранились гены, действующие в ходе нормальной дифференцировки. Возможно, что для любой линии лейкемических миелоидных клеток, утративших чувствительность к нормальному фактору дифференцировки, можно подобрать подходящую комбинацию веществ, которая будет индуцировать созревание клеток и прекращение их деление.

Злокачественные клетки других линий тоже можно искусственно принудить к дифференцировке. Ш. Фрэнц из Медицинского колледжа Маунт-Синай обнаружила, что соединение, называемое диметилсульфоксидом, заставляет дифференцироваться лейкемические клетки эритроидного ряда. П. Марк и Р. Рифкинд из Центра по изучению рака им. Слоана-Кеттеринга показали, что такой же эффект имеют и иные химические вещества. Изученные линии лейкемических клеток эритроидного ряда были нечувствительны к эритропоэтину — белку, в норме индуцирующему образование гемоглобина в развивающихся эритроидных клетках, т.е. были подобны лейкемическим клеткам клонов D^- в том отношении, что не реагировали на нормальный фактор дифференцировки (способность к синтезу гемоглобина — характерное свойство зрелых эритроцитов). Имеются данные о том, что некоторые из веществ, стимулирующих дифференцировку лейкемических клеток, так же действуют на злокачественные клетки других типов, в том числе на клетки нейробластомы (раковая опухоль, развивающаяся из эмбриональных нервных клеток) и тератокарциномы (злокачественная опухоль, образующаяся в результате нарушения эмбрионального развития и состоящая из тканей нескольких типов).

МЫ ОБНАРУЖИЛИ, что различные вещества, способные приводить к дифференцировке лейкемических клеток, действуют разными путями. Некоторые из агентов, вызывающих дифференцировку клеток D^+ , индуцируют образование нормального фактора дифференцировки, «включая» гены, обеспечивающие его син-



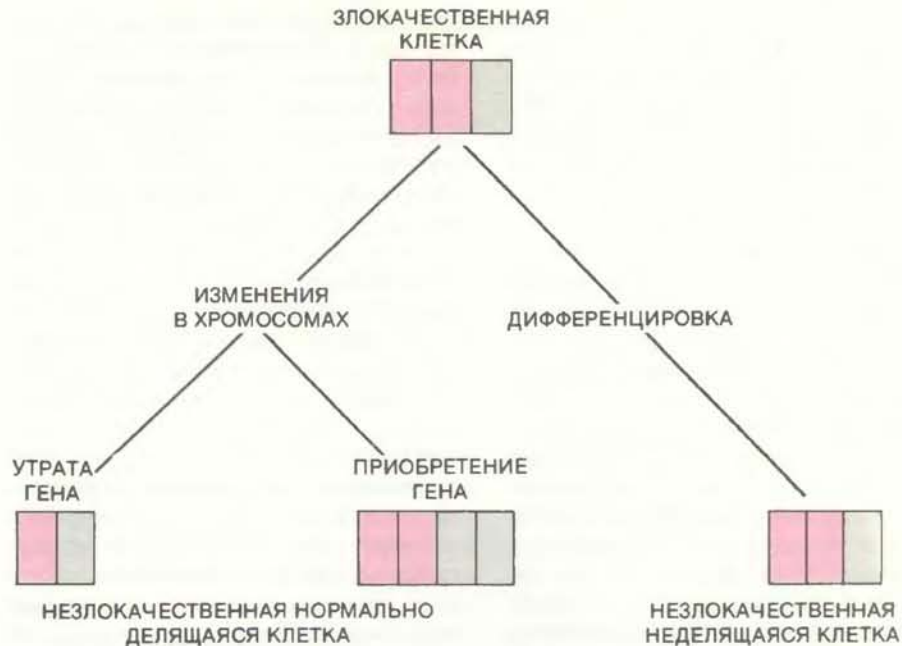
ВЫЖИВАНИЕ МЫШЕЙ, которым ввели лейкемические миелоидные клетки. Животные выживали лучше, если получали фактор дифференцировки (цветной график), чем если они его не получали (черный график). Лейкемические клетки были взяты из клонов D^+ , т.е. в культуре при добавлении фактора дифференцировки они созревали и прекращали размножаться. Эти данные свидетельствуют, что фактор дифференцировки подавляет развитие лейкемии.

тез. Другие, как, например, стероидные гормоны, воздействуют на геном прямо, без посредства нормального фактора дифференцировки. В некоторых клонах клеток D^- для дифференцировки требуется обработка одновременно несколькими агентами, каждый из которых приводит к активации одного из генов, необходимых для процесса дифференцировки клетки. Вместе эти вещества активируют набор генов, деятельность которых достаточна для осуществления дифференцировки клетки.

Изучение клеточных белков в нормальных и лейкемических клетках выявило генетические основы того, что разные линии лейкемических клеток различным образом реагируют на вещества, вызывающие дифференцировку. Д. Либерман, Б. Хоффман-Либерман и я с помощью метода двумерного гель-электрофореза, позволяющего разделять белки по их молекулярной массе и электрическому заряду, сравнивали белковый состав клеток различных клонов или одного и того же клона на разных стадиях его развития. Изменения в составе синтезируемых в клетках белков отражаются на картине электрофореза. Некоторые изменения явно имели отношение к злокачественному характеру лейкемических клеток. Например, мы обнаружили, что в нормальных предшественниках миелоидных клеток фактор роста индуцирует синтез одних белков и прекращает синтез других. А в лейкемических клетках эти изменения в составе белков наблюдались без индукции, т.е. были «конститутивными». Как предполагается, лейкемические клетки не нуждаются в поступлении фактора роста извне потому, что гены, на которые он обычно действует, уже «включены» или «выключены».

Мы также идентифицировали некоторые из изменений белкового состава, вызываемых в нормальных клетках фактором дифференцировки. В лейкемических клетках D^+ , так же как и в нормальных, изменения в составе белков происходят после воздействия фактора дифференцировки, т.е. они «индуцируемые». В клетках же D^- многие из этих изменений были конститутивными. Чем менее клон чувствителен к нормальному фактору дифференцировки, тем больше конститутивных изменений белкового состава клеток.

Наши результаты приводят к заключению, что для нормального процесса дифференцировки требуется синхронная экспрессия ряда генов; видимо, необходимо взаимодействие между белками, кодируемыми этими генами. Когда экспрессия гена стано-



ПРЕКРАТИТЬ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫЙ РОСТ можно двумя путями. Клетки становятся злокачественными в результате генетических изменений, нарушающих нормальное равновесие между онкогенами — т.е. генами, вызывающими злокачественное перерождение (*цветные*), — и генами, подавляющими экспрессию онкогенов (*серые*). В культуре злокачественных клеток наблюдался возврат к нормальному росту в результате хромосомных перестроек, восстанавливающих равновесие между онкогенами и их супрессорами (*слева*). Ликвидация злокачественности через дифференцировку клеток идет в обход генетических изменений (*справа*): геном остается ненормальным, но клетки достигают зрелости, прекращают делиться и перестают быть злокачественными.

вится не индуцируемой, а конститутивной, координация экспрессии генов нарушается. В результате дифференцировка не может осуществляться и появляются клетки, которые никогда до конца не дифференцируются, а продолжают делиться. Дж. Симондс и я обнаружили, что некоторые сыворотки ликвидируют конститутивные изменения в клетках D^- , так что для появления соответствующих белков опять необходима индукция. После обработки такими сыворотками к клеткам возвращается способность созреть под влиянием нормальных факторов дифференцировки. Иными словами, нам удалось восстановить осуществление генетической программы дифференцировки.

Поскольку различные вещества могут стимулировать созревание клеток D^- несмотря на конститутивные изменения, делающие клетки нечувствительными к нормальному фактору дифференцировки, можно предполагать, что существует несколько генетических программ для дифференцировки. Л. Коэн и я с помощью метода двумерного электрофореза изучали клеточные белки в лейкемических миелоидных клетках двух видов. Созревание одних могло быть индуцировано нормальным фактором дифференцировки, но не стероидным гормоном дексаметазоном, а другие, наоборот,

были чувствительны к гормону, но не к фактору дифференцировки. В клонках этих двух видов мы обнаружили разные конститутивные изменения белкового состава. По-видимому, нормальный фактор дифференцировки и индукторы иной природы активируют разные наборы генов, хотя конечный эффект — созревание клетки — оказывается одинаковым. Вполне вероятно, что и в злокачественных клетках других типов существует несколько различных генетических путей дифференцировки.

ОКАЗАЛОСЬ, что среди изученных нами клонов лейкемических миелоидных клеток ни в одном нет нормального набора хромосом. Наблюдались разнообразные дефекты: изменение числа хромосом, перестройки и делеции сегментов, причем клоны, в которых можно было индуцировать созревание клеток с помощью фактора дифференцировки, всегда явно отличались от клонов, нечувствительных к нему. С изменениями в структуре хромосом, имеющими место в лейкемических клетках, вероятно, связаны генетические дефекты регуляции клеточного роста и дифференцировки, делающие клетки злокачественными.

Одним из способов ликвидации злокачественных свойств клетки может

быть восстановление нормального состояния хромосом. В 1968 г. З. Рабинович и я показали, что в клонах саркомных клеток (саркома — это злокачественная опухоль соединительной ткани), если их выращивать в определенных условиях, часто появляются незлокачественные клетки. В клонах саркомных клеток, которые К. Борек и я получали, обрабатывая культуру нормальных фибробластов химическими канцерогенами или рентгеновским излучением, наблюдались клетки-ревертанты, время жизни которых было ограничено, как и у нормальных фибробластов. По хромосомам они также отличались от своих злокачественных предков и были ближе к нормальным клеткам.

В хромосомах, изменения в которых существенны для «излечения» злокачественных клеток, содержатся гены, которые я тогда назвал генами *E* (гены экспрессии злокачественности) и *S* (гены супрессии злокачественности). Хромосомные изменения, ликвидирующие влияние генов *S* на гены *E*, вызывают рак; изменения, восстанавливающие равновесие, возвращают развитие клетки на нормальный путь. Позднее гены *E* были выделены во многих лабораториях и получили название онкогенов; гены *S* можно назвать сонкогенами или антионкогенами.

Мы задались вопросом: восстанавливается ли нормальное состояние хромосом в лейкоэмических клетках, в которых искусственно вызваны дифференцировка и прекращение деления? Происходит коррекция генетических дефектов или же развитие клетки переключается со злокачественного на нормальное «в обход» этих нарушений? Мы обнаружили, что в лейкоэмических миелоидных клетках, принужденных к дифференцировке, аномалии хромосом сохраняются. Следовательно, с помощью индукции дифференцировки остановка злокачественного роста достигается в обход тех генетических дефектов, которые нарушили нормальный ход событий дифференцировки и размножения.

ОТКРЫТИЕ того, что злокачественный рост можно остановить, если заставить злокачественные клетки дифференцироваться и прекратить размножаться, создает новые возможности для лечения рака. Во-первых, не исключено, что когда-нибудь будет найден способ ликвидировать сами генетические дефекты. Во-вторых, имеет смысл попытаться «обходить» генетические дефекты путем индукции лейкоэмических клеток к дифференцировке; этот аспект подда-

ется изучению уже сейчас. В моей группе в Вейцмановском институте было показано, что развитие лейкемии у мышей, которым инъецировали лейкоэмические клетки D^+ , замедляется, если давать им фактор дифференцировки или вещество, стимулирующее его синтез в нормальных клетках тела. Может быть, аналогичного эффекта удастся достичь и в человеческом организме. Это позволило бы не применять для лечения лейкоэмий цитотоксические препараты, которые убивают не только больные, но и здоровые клетки.

Кроме того, факторы роста и дифференцировки макрофагов и гранулоцитов будут полезны больным, проходящим курс традиционной терапии цитотоксическими средствами по поводу других видов рака, так как они обеспечат поддержание популяций макрофагов и гранулоцитов, истощающихся вследствие химиотерапии. Эти факторы роста и дифференцировки пригодятся также в случае не связанного с раком недостатка макрофагов и гранулоцитов. Факторы роста и дифференцировки, действующие на клетки других типов, могут найти аналогичное применение.

Для лечения тех форм лейкемии, когда, как в случае клонов D^- , отсутствует чувствительность к нормальному фактору дифференцировки, можно использовать другие вещества, индуцирующие дифференцировку. В настоящее время эти соединения в больших дозах применяются при химиотерапии рака. Наши работы показывают, что эффективность таких лекарств определяется, по-видимому, не только тем, что они убивают клетки, но также их способностью вызывать дифференцировку либо непосредственно, либо индуцируя в клетках синтез фактора дифференцировки. Наблюдавшиеся у больных раком индивидуальные различия в реакции организма на химиотерапевтические средства, возможно, объясняются различной чувствительностью злокачественных клеток к препаратам, вызывающим дифференцировку.

Методы лечения лейкемии, в основе которых лежит воздействие на процессы дифференцировки, позволяют использовать традиционные химиотерапевтические препараты в существенно меньших дозах, в частности в сочетании с нормальным фактором дифференцировки. Некоторые лекарства можно применять в малых дозах для индукции дифференцировки, а другие — в больших дозах для цитотоксического эффекта и уменьшения таким образом общего числа лейкоэмических клеток. Чтобы выбрать наилучшую для данного боль-

ного комбинацию препаратов и методов, можно предварительно проверять их на его собственных клетках, выращенных вне организма, изучая реакцию этих клеток на различные вещества.

Мои идеи побудили некоторых исследователей начать клинические испытания индукторов дифференцировки в качестве лекарств от миелоидной лейкемии. Например, Л. Дего из Клиники Сан-Луи в Париже получил обнадеживающие результаты с малыми дозами цитозинарабинозида — одного из препаратов, вызывающих дифференцировку миелоидных лейкоэмических клеток *in vitro*. Похоже, что в исследованиях клеток миелоидного ряда выявлены закономерности, свойственные и другим клеткам с их специфическими факторами роста и дифференцировки. Если это действительно так, то ликвидация злокачественности посредством индукции клеточной дифференцировки в конце концов станет реальным способом лечения рака.

Издательство
МИР
предлагает:

К. Хейниг
КАРЛ ШОРЛЕММЕР

Перевод с немецкого

Книга представляет собой очерк жизни и деятельности одного из видных химиков-органиков второй половины XIX века, ученого-коммуниста, друга Маркса и Энгельса. Историческая обстановка, общая характеристика научной и общественно-политической деятельности — это фон и основа, на которых развивается повествование о жизни ученого. Автор рассказывает о его экспериментальных работах в области парафиновых углеродов, педагогической и литературной деятельности, в частности, о создании учебника химии, по которому училось не одно поколение химиков.

1978, 5 л. Цена 30 к.



Издательство
МИР
предлагает:

Г. Реклейтис,
А. Рейвиндран,
К. Рэгсдел
**ОПТИМИЗАЦИЯ В
ТЕХНИКЕ**

В двух книгах

Перевод с английского

Систематическое и доступное изложение существующих методов оптимизации. Строгие доказательства, как правило, заменяются графиками и таблицами, позволяющими читателю, не имеющему специальной подготовки, решать прикладные задачи. Основное внимание уделено рассмотрению методов оптимизации применительно к стационарным детерминированным моделям систем с непрерывно изменяющимися параметрами, когда принятому критерию оптимальности соответствует единственная целевая функция. Обсуждаются также многокритериальные задачи оптимизации с привлечением математического аппарата целочисленного и дискретного программирования. Приводятся классические методы прямого поиска минимума и градиентные. Много места уделено задачам линейного и нелинейного программирования. Для решения задач нелинейного программирования предложены процедуры линейной квадратичной аппроксимации целевой функции и ограничений в сочетании с методами множителей Лагранжа и переменной метрики. К большому достоинству книги можно отнести наличие 260 примеров решения задач оптимизации. При этом 60 из них представлено в виде рабочих программ для ЭВМ.

Для инженеров, специализирующихся в области проектирования технических устройств и систем, а также для аспирантов и студентов инженерных вузов.

1986, 21 л. Цена 1 р.20 к.



**Возможно ли
предотвращение
природных
катастроф?**

В СВЯЗИ с трагическими событиями в Колумбии и Мексике появление в журнале "Geology" статьи Дж. Смита из Чикагского университета оказалось неожиданно своевременным. Смит убежден, что такие катастрофы, как извержения вулканов, землетрясения и даже столкновения Земли с кометами и астероидами, пора перестать считать событиями, не поддающимися контролю со стороны человека.

Высказываемая им мысль не является новой; так, уже с 60-х годов обсуждается возможность заблаговременного разрушения астероидов при угрозе их столкновения с Землей. Смит считает, что имеются две причины, по которым эти идеи следует снова более внимательно рассмотреть. Во-первых, проекты защиты человечества от природных катаклизмов, несмотря на их в высшей мере умозрительный характер, уже не кажутся фантастическими с точки зрения наших современных технических возможностей. Во-вторых, «ставки в этой игре возросли»: последние исследования показывают, что падение на Землю астероида или мощное вулканическое извержение могут не только вызвать локальные разрушения, но и привести, например, к существенным климатическим изменениям на всем земном шаре.

Смит предлагает некоторые возможные меры предупреждения. Большая часть из примерно 700 вулканов, представляющих опасность, в настоящее время не обследуется систематически. На них следует разместить сейсмометры, газовые детекторы и наклонометры (фиксирующие вспучивание земной поверхности, которое может предшествовать извержению). Результаты наблюдений могли бы передаваться в центры сбора данных через спутники.

Представим себе, что за каждым вулканом наблюдали бы так же пристально, как за вулканом Сент-Хеленс; в этом случае ученые смогли бы с большой точностью и достоверностью предупреждать о грозящей катастрофе, а власти — своевременно организовывать эвакуацию населения. Конечной целью должна стать возможность предупреждения или ослабления извержений. В этой связи

Смит рассматривает два предложения, которые заслуживают дальнейшего изучения: бурение скважин, достигающих магматической камеры под вулканом, что может способствовать спокойному выходу магмы, и осушение озер в кальдерах вулканов для предотвращения взрывоопасного взаимодействия раскаленной подземной лавы с водой.

Наиболее тяжелые последствия могло бы иметь столкновение Земли с большим астероидом, подобным тому, который, по мнению многих исследователей, стал причиной массовой гибели динозавров 65 млн. лет назад. Очевидно, что такие катастрофические события случаются редко, но Смит полагает, что падение намного меньших, но все-таки опасных метеоритов в населенные районы может происходить каждые 1—10 тыс. лет. В связи с этим он предлагает программу для обнаружения и слежения за кометами и астероидами, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Программа предусматривает сооружение по крайней мере 10 новых оптических телескопов, вывод на околоземную орбиту инфракрасных и оптических телескопов, регулярные запуски космических зондов, подобных тем, которые исследуют сейчас комету Галлея. На основании полученных данных ученые смогли бы принимать меры по отклонению или уничтожению объекта, движущегося к Земле.

Методы уничтожения астероидов в некоторых аспектах должны быть схожи с теми, которые администрация Рейгана собирается применить в своей программе «стратегической оборонной инициативы». Как и программа «звездных войн», программа мер, предлагаемая Смитом (в которой предусмотрено также постепенное развертывание исследований по предсказанию и предупреждению землетрясений), должна быть очень дорогостоящей. Необходимые средства могли бы появиться в результате международной договоренности о снижении затрат на производство ядерного оружия (для начала на несколько процентов в год). Контроль за расходом этих денег могла бы осуществлять специальная международная организация. По мнению Смита, сотрудничество народов в деле защиты человечества от природных катаклизмов само по себе могло бы стать «небольшим, но важным катализатором процесса превращения Земли в мирную планету».



Структура хвостов комет

Образование плазменного хвоста

и отсоединение его от кометы — результат влияния

солнечного ветра и его магнитного поля. Наблюдения комет

Галлея и Джакобини—Циннера помогут лучше понять эти явления

ДЖОН К. БРАНДТ, МАЛКОЛМ Б. НИДЕР-МЛАДШИЙ

ПРОЙДЕТ время, и 1985 — 1986 гг. будут называть «звездным часом» в истории кометной астрономии. Если бы нам — ученым, занимающимся изучением комет, было бы предоставлено право выбрать два года, которые мы хотели бы посвятить наиболее активным исследованиям, без сомнения, мы выбрали бы именно этот период, поскольку сразу две из наиболее известных комет — Джакобини—Циннера и Галлея — в своем движении вокруг Солнца вошли в области, доступные земному наблюдателю. Комета Джакобини—Циннера стала первой из комет, встретившей на своем пути космический аппарат. Исследования кометы Галлея будут проводиться с небывалым размахом. Сбор данных будет вестись на обсерваториях, находящихся на поверхности Земли, с помощью космического корабля, выведенного на околоземную орбиту, со спутников, находящихся в межпланетном пространстве и на орбитах планет, а также с шести космических аппаратов, которые пролетят около атмосферы кометы или сквозь нее.

Периодические, достаточно яркие кометы Джакобини—Циннера и Галлея, обладая большинством характерных для этого класса небесных тел особенностей, исключительно удобны для исследований еще и потому, что станут объектами внимательного изучения практически одновременно. Астрономы смогут сравнить результаты исследований двух различных комет, полученные при сходных методиках наблюдения. Широкие мероприятия по изучению комет Джакобини—Циннера и Галлея обещают предоставить прямые данные

для проверки существующих теорий происхождения, состава и динамики комет и их хвостов; ожидается, что полученные результаты поставят ряд новых интересных вопросов.

11 сентября 1985 г. Международный кометный спутник ICE (International Cometary Explorer) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) промчался сквозь хвост кометы Джакобини — Циннера и передал большой объем информации, которую в настоящее время продолжают обрабатывать. Космические зонды Европейского космического агентства, Японии и СССР приблизятся к комете Галлея в марте 1986 г., передавая ценные сведения о структуре, составе и физических свойствах кометной атмосферы. Планируется также получить первые изображения ядра кометы. Исследования кометы с помощью межпланетных космических аппаратов дополнятся наблюдениями с широкой сети наземных станций, а также экипажа космического корабля многоразового пользования (шаттл) по программе НАСА «Астро-1».

СОВРЕМЕННЫЕ космические эксперименты продолжают многовековую историю наблюдения комет. Само слово «комета» пришло к нам от греческих астрономов, которые первыми назвали этих солнечных посетителей *aster kometes* — «длинноволосые звезды». В настоящее время известно, что комета состоит из трех основных частей: атмосферы, хвоста и ядра. Видимую часть атмосферы обычно называют комой, или головой; это, по существу, сферическое га-

зопылевое облако. Диаметр атмосферы в зависимости от ее газового состава может составлять от тысячи до нескольких миллионов километров. За атмосферой в направлении, противоположном Солнцу, вытягиваются один или несколько хвостов. Выделяют два различных вида хвостов: пылевой и плазменный.

Типичные пылевые хвосты состоят из мелких твердых частиц размером около 1 мкм, отброшенных из комы назад силой светового давления Солнца. Эти изогнутые размытые хвосты обычно не обнаруживают внутренней структуры. Плазменные хвосты имеют совершенно иную природу. Они состоят из молекул, ионизованных в атмосфере кометы солнечным излучением и захваченных межпланетным магнитным полем, генерируемым динамо-процессами на Солнце. Силовые линии магнитного поля, увлекая за собой ионизованные молекулы, обвиваются вокруг кометы, образуя сложную вытянутую структуру, по форме напоминающую шпильку, в которой наблюдаются нитевидные образования, узлы и крупномасштабные возмущения. Газы в коме и хвосте кометы флуоресцируют, поглощая и переизлучая солнечный свет.

Согласно общепринятой модели, предложенной Ф. Уипплом в 1950 г., источником кометного вещества служит ядро, находящееся внутри атмосферы, но никогда не наблюдавшееся в телескоп из-за малых размеров. Ядро, которое Уиппл сравнил с грязным снежным комом, представляет собой конгломерат льдов различных веществ. Пылинки, а возможно, и более крупные твердые образования сравнительно равномерно вкраплены в цементирующую ледяную основу. Считают, что ядро представляет собой сфероид диаметром несколько километров. Каким же образом столь небольшое тело порождает плазменные хвосты, вытягивающиеся иногда на расстояние около 50 млн. км?

Разгадка заключается в динамике процесса высвобождения вещества яд-

КОМЕТА ВЕСТА. На фотографии, полученной 9 марта 1976 г., хорошо заметны два хвоста — пылевой и плазменный. В более широком и размытом пылевом хвосте, состоящем из твердых частиц, отброшенных из кометной атмосферы назад силой светового давления Солнца, различимы три яркие полосы, разделенные слабо светящимися промежутками. Более узкий плазменный хвост (справа от них) состоит из ионизованных молекул, которые захвачены магнитным полем солнечного ветра, обволакивающим комету.



КОМЕТА ДЖАКОБИНИ — ЦИННЕРА. Электронное изображение сделано У. Финком в Туссонской лаборатории Луны и планет с помощью прибора с зарядовой связью (данные от 26 июля 1985 г.). Атмосфера кометы несколько вытянута в направлении от Солнца. Плазменный хвост не заметен, по-видимому, из-за недостаточной длительности экспозиции.

ра в межпланетное пространство. При приближении кометы к Солнцу поглощаемая солнечная энергия нагревает ледяное ядро кометы и начинается его сублимация — непосредственный переход из твердого в газообразное состояние. Газы вырываются из ядра с начальной скоростью несколько сотен метров в секунду; при этом они вступают в разнообразные химические реакции. Кроме того, сталкиваясь с высвободившимися пылинками, молекулы газа увлекают их во внешние от ядра области. Молекулы многих газов, поглощая кванты ультрафиолетового излучения, распадаются на более мелкие молекулы, увеличивая свою кинетическую энергию (этот процесс называют фотодиссоциацией). Такое преобразование солнечного света в кинетическую энергию движения молекул газа, а также давление более плотного газа, выталкивающее эти молекулы из областей, близких к ядру, ускоряют их до скоростей около 1 км/с. Смесь газа и пыли расширяется, образуя атмосферу кометы, которая, не удерживаясь слабыми силами тяготения ядра и расширяясь в космический вакуум, непрерывно обновляется за счет истечения новых частиц из вещества ядра.

Газы, покидающие ядро, претерпевают сложную серию превращений, в

результате которых образуются новые молекулы; проведенное недавно численное моделирование этого процесса включало более 1200 разнообразных реакций. Сублимированные газы вступают также во взаимодействие с солнечными корпускулярными потоками, обтекающими комету. Одна из таких реакций, так называемая перезарядка, заключается в том, что протон захватывает у молекулы или атома кометного газа электрон и образует электрически нейтральный атом водорода и положительно заряженный ион. Взаимодействие между нейтральным и ионизованным газом также приводит к обмену заряда. В подобных реакциях первоначальный химический состав ядра кометы изменяется, и создается значительная концентрация ионов в коме. Эти ионы и составляют вещество плазменного хвоста кометы.

Изобретение фотографии в XIX в. явилось поворотным пунктом в исследовании образования и структуры плазменного хвоста. Первые высококачественные фотографии комет были, вероятно, получены сэром Дейвидом Гиллом в 1882 г., однако практически этот метод стали использовать десятилетие спустя, при появлении кометы Свифта. Впервые фотографические методы для исследования хво-

стов комет последовательно применил Эдуард Эмерсон Барнард, работая с таким простым прибором, как камера с портретным объективом. Он заметил, что плазменные хвосты имеют крайне замысловатую форму: они представляют собой переплетенные лучистых структур и тонких струй с узлами, спиралей и сгустков. По серии фотографий, сделанных в течение одной ясной ночи, Барнард заметил, что части плазменного хвоста движутся с большими скоростями. Фотографии, сделанные в последующие ночи, часто совершенно не походили одна на другую. Хотя Барнард не знал реальной природы этих быстроменяющихся хвостов, он смог отличить их от медленно меняющихся хвостов, известных сейчас как пылевые.

Исследования Барнарда привели к главному открытию на заре кометной фотографии: плазменные хвосты отрываются и уносятся в межпланетное пространство, а на их месте возникают новые. В статье «Аномальные хвосты комет», опубликованной в 1905 г., Барнард описал это загадочное циклическое явление и настаивал на необходимости многократного ежесуточного фотографирования комет. Он писал: «День — слишком большой период в истории кометы, и ее изменения изо дня в день совсем не обязательно взаимосвязаны. Для понимания сути имеющихся место изменений необходимо иметь ежечасную историю жизни кометы. Съемку очень ярких комет следует проводить с интервалом в полчаса, так долго и так непрерывно, как позволяют условия. Таким образом будет возможно объяснить движения частиц в хвостах различных комет». Исходя из своих исследований, Барнард предположил, что отсоединение хвоста вызвано взаимодействием с «потоками в межпланетном пространстве, через которые может проноситься хвост».

ПОСЛЕ опередивших свое время работ Барнарда существенного прогресса в исследовании комет не наблюдалось до 1951 г., когда Л. Бирман занялся изучением природы этих потоков, анализируя движение и ускорение структур, наблюдаемых в плазменных хвостах комет. Он пришел к выводу, что силы светового давления недостаточно для вытягивания хвостов комет от Солнца. Бирман утверждал, что некое «корпускулярное излучение», непрерывно испускаемое Солнцем, сталкиваясь с кометными ионами, должно образовать хвост и создать сильное ускорение вещества, наблюдаемое в нем.

Следующий шаг заключался в том,

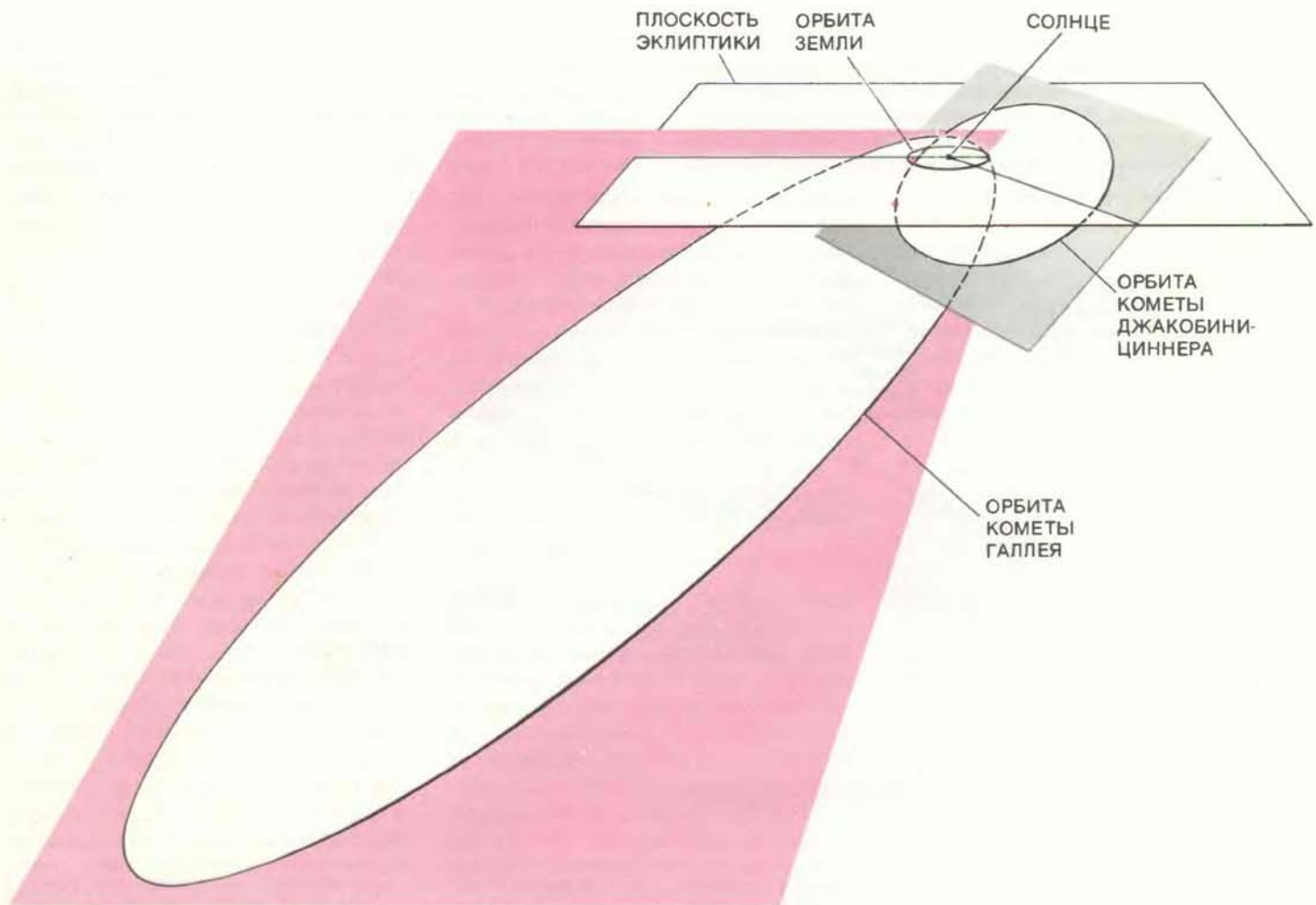
чтобы определить природу этих гипотетических солнечных корпускул и понять механизм образования сложной структуры плазменного хвоста. Известно, что водород и гелий ионизируются в солнечной короне (разреженной внешней области атмосферы Солнца); образующиеся при этом протоны и электроны покидают Солнце, поскольку их температура очень высокая. Э. Паркер из Чикагского университета установил, что эти частицы, преодолев солнечную гравитацию, должны ускоряться в межпланетном пространстве. Он ввел термин «солнечный ветер», чтобы отразить динамику движения излучения через Солнечную систему. В 1957 г., за год до опубликования пионерской работы Паркера, Х. Альфвен из Королевского технологического института в Стокгольме предположил, что это «корпускулярное излучение», вероятно, «уносит» в пространство солнечное магнитное поле. В своей работе он показал, что силовые линии магнитного поля солнечного ветра «связывают» плазму солнечного вет-

ра с кометными ионами, образуя плазменные хвосты. В настоящее время альфвеновская модель «трубок магнитного потока» общепринята. Наши исследования и наблюдения комет Джакобини—Циннера и Галлея позволяют уточнить его теорию.

Теория Альфвена основана на предположении о столкновении солнечного ветра с газами кометной атмосферы. Солнечный ветер с «вмороженными» в него магнитными силовыми линиями налетает на комету с характерной скоростью около 400 км/с. В отличие от плазмы солнечного ветра, удаляющейся от Солнца, только что образовавшиеся ионы кометного газа движутся по направлению к Солнцу с предположительной скоростью 1 км/с. Существенно, что заряженные частицы не могут свободно двигаться поперек магнитного поля, а перемещаются по спиральным траекториям, навиваясь на силовые линии поля. Поэтому ионы из внешних слоев атмосферы кометы (500 000 км и более от ядра), попадая в плазму солнеч-

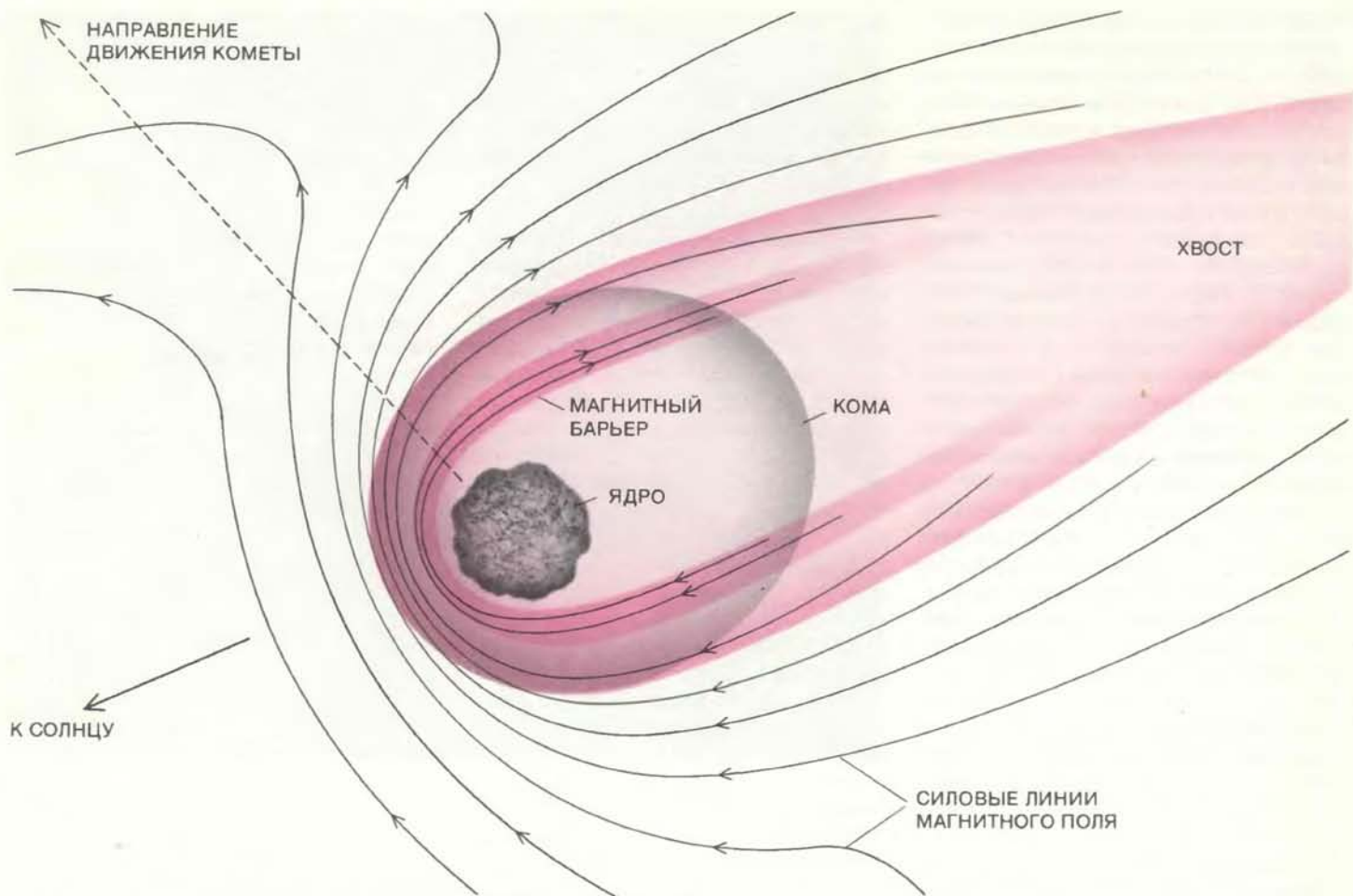
ного ветра, захватываются магнитными силовыми линиями и начинают обратное движение к комете вместе с солнечным ветром.

Солнечный ветер, «нагружаясь» кометными ионами, замедляется согласно закону сохранения импульса. Процесс торможения усиливается по мере увеличения числа кометных ионов, захваченных при продвижении солнечного ветра во внутренние слои атмосферы. В конце концов захватывается так много ионов и поток столь сильно замедляется, что давление солнечного ветра (несущего захваченные ионы), направленное к ядру кометы, уравнивается направленным вонне давлением ионов и других газов, находящихся ближе к ядру. В этой области (ее называют застойной зоной) поток солнечного ветра останавливается. Магнитное поле солнечного ветра, непрерывно «сжимаясь» в процессе торможения, образует неподвижный магнитный барьер. Магнитный барьер расположен глубоко в атмосфере; так, для яркой кометы типа кометы Галлея он может образо-



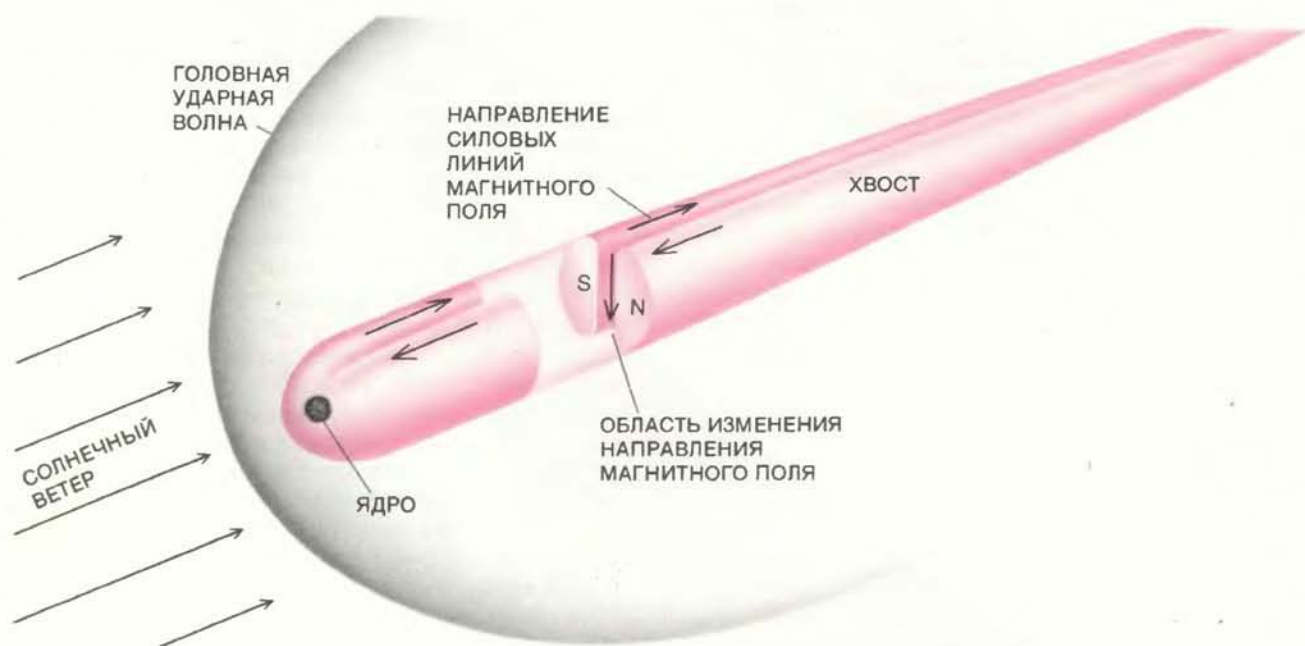
КОМЕТЫ ДЖАКОБИНИ — ЦИННЕРА И ГАЛЛЕЯ, обращаясь вокруг Солнца, периодически входят во внутренние области Солнечной системы. Комета Галлея приближает-

ся к Земле примерно каждые 76 лет, а комета Джакобини—Циннера — каждые 6,5 лет. Цветные точки указывают положение обеих комет и Земли на 15 января 1986 г.



СИЛОВЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, вносимые потоком солнечного ветра в кометную атмосферу, сгущаются в ней по мере увеличения массы потока за счет захваченных им кометных ионов. При этом, согласно закону сохранения импульса, поток тормозится. В глубине атмосферы давление потока солнечного ветра, «нагруженного» кометными

ионами, уравнивает давление ионов, летящих от ядра. Образуется магнитный барьер. Плазма солнечного ветра и силовые линии не проникают за этот барьер в глубь атмосферы; внутри кометы образуется область, свободная от магнитного поля. Силовые линии, обогнув эту область, вытягиваются сзади, увлекая с собой ионы из атмосферы.



ИОНЫ В ПЛАЗМЕННОМ ХВОСТЕ «навиваются» на силовые линии магнитного поля солнечного ветра, обволакивающие комету. Доли хвоста с противоположной полярностью магнитного поля разделяются слоем электрического тока (вертикальная стрелка) со слабым магнитным полем. Уве-

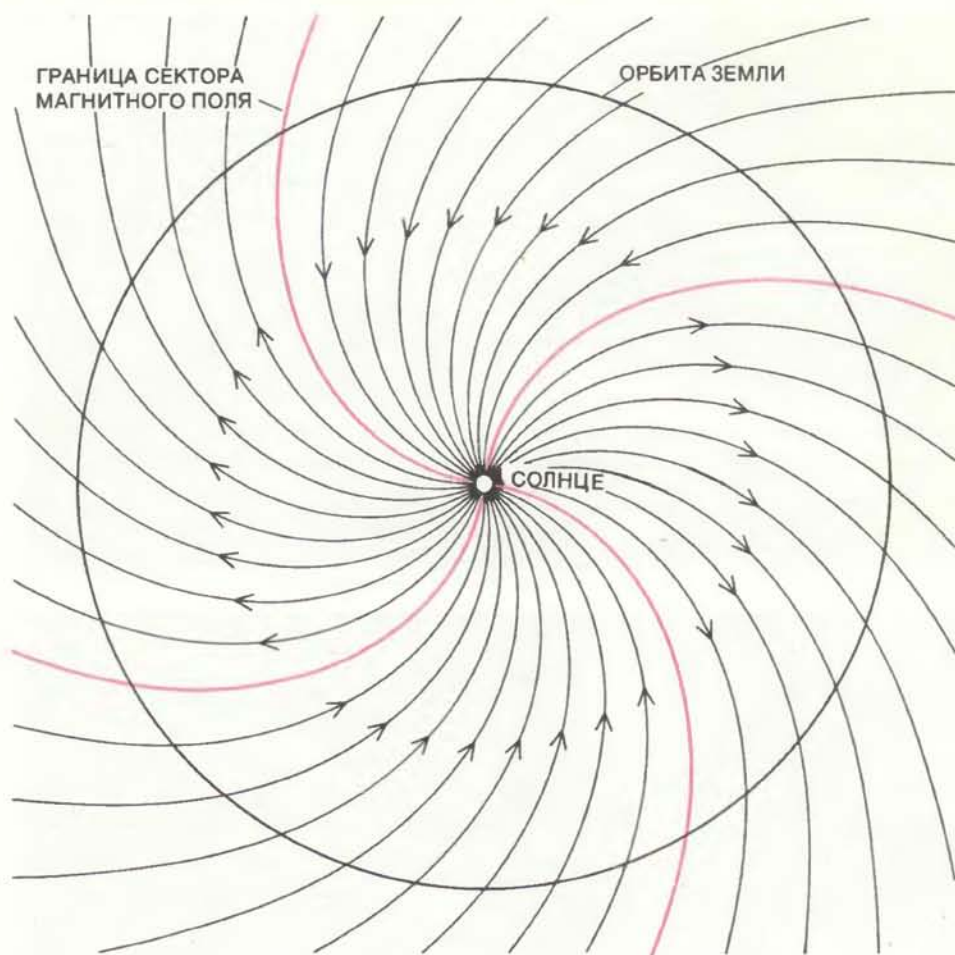
личив свою массу за счет захваченных кометных ионов, сверхзвуковой поток солнечного ветра резко замедляется, образуя «головную ударную волну». Аналогичные ударные волны возникают при полете сверхзвукового самолета или движении катера по воде.

ваться на расстояниях от 1000 до 10 000 км от ядра.

КОМЕТА представляет собой препятствие на пути высокоскоростных потоков солнечного ветра. В результате на расстояниях 50 000 — 100 000 км от ядра образуется «головная ударная волна». Подобные волны вызывает идущий по воде корабль. На флангах солнечный ветер, захватывая меньше кометных ионов, тормозится слабее. Магнитные силовые линии, сгущаясь и останавливаясь у магнитного барьера, обходят комету с флангов, обволакивая ее, и вытягиваются сзади с двух сторон от плоскости симметрии хвоста, образуя две доли противоположной полярности. Структуру магнитного поля хвоста кометы можно наблюдать, поскольку силовые линии направляют флуоресцирующие кометные ионы, например монооксида углерода и паров воды.

Магнитное поле, «вмороженное» в солнечный ветер, взаимодействует с магнитным полем кометного хвоста и периодически вызывает его отсоединение. Подобное явление впервые наблюдал Барнард. Наши наблюдения кометы Когоутека в 1973 — 1974 гг. прояснили динамику этого процесса. В объединенной обсерватории кометных исследований в Соккоро (шт. Нью-Мексико) было выполнено детальное фотографирование этой кометы. Полученные изображения выявили богатство структурных образований в плазменном хвосте. На снимках, сделанных в течение ночи, хорошо видно, что хвост обрывается на некотором расстоянии от головы кометы, а затем, по-видимому, возникает вновь. Мы внимательно изучили фотографии Барнарда с тем, чтобы определить, является ли «отсоединение» хвоста общим свойством комет или же мы неправильно интерпретируем размытое изображение на пленке. Сличение фотографий дает основание считать отсоединение хвоста общим свойством комет.

Затем мы задались целью объяснить, как, несмотря на то, что магнитные силовые линии не имеют ни начала, ни конца, может произойти отсоединение хвоста комет. Для этого были использованы результаты измерения параметров плазмы и магнитного поля в окрестности Земли, полученные со спутника Eighth Interplanetary Monitoring Platform и пересчитанные к положению кометы Когоутека. Мы обнаружили вероятную причину отсоединения хвоста. Оказалось, что комета Когоутека теряет хвост в момент перехода границы между двумя секторами межпланет-



СПИРАЛЬНАЯ ФОРМА межпланетного магнитного поля (в плоскости земной орбиты) — результат вращения Солнца вокруг своей оси. При каждом обороте Солнца наблюдаются четыре «сектора поля» чередующейся полярности.

ного магнитного поля с противоположной полярностью. Мы предположили, что процесс отсоединения происходит каждый раз, когда комета переходит из одного сектора магнитного поля в другой. За 25-дневный период обращения вокруг своей оси Солнце образует четыре сектора магнитного поля переменной полярности, вращающихся вместе с Солнцем и непрерывно расширяющихся. В плоскости земной орбиты эти сектора выглядят как четыре раскручивающиеся спирали.

СОГЛАСНО нашей модели, в межпланетном магнитном поле такой геометрии комета может периодически терять свой хвост, поскольку, «выставив» хвост в секторе с одним направлением магнитного поля, она теряет его при переходе в сектор, где магнитное поле направлено в противоположную сторону. С точки зрения физики плазмы противоположное направление полей создает крайне неустойчивую конфигурацию. В результате такой геометрии полей происходит процесс, называемый пересоединением магнитных силовых ли-

ний, или аннигиляцией магнитного поля. Теоретические детали этого явления, несмотря на десятилетние исследования, пока изучены плохо, однако общепринято, что топология магнитного поля в атмосфере кометы может сильно меняться. Когда к магнитным силовым линиям кометы приближаются силовые линии нового сектора, первые разрываются и тотчас вновь соединяются, но уже не между собой, а с силовыми линиями сектора. Таким образом, комета начинает двигаться в новом магнитном поле, а оторвавшиеся от кометы «старые» силовые линии продолжают удерживать оставшееся внутри их кометное вещество. Отрыв хвоста наблюдается, по-видимому, когда последняя порция вещества, удерживаемого «старым» полем, достаточно далеко удалится от кометы. Когда процесс отсоединения завершен, комета немедленно начинает «отрашивать» новый плазменный хвост, полярность которого соответствует полярности нового сектора магнитного поля.

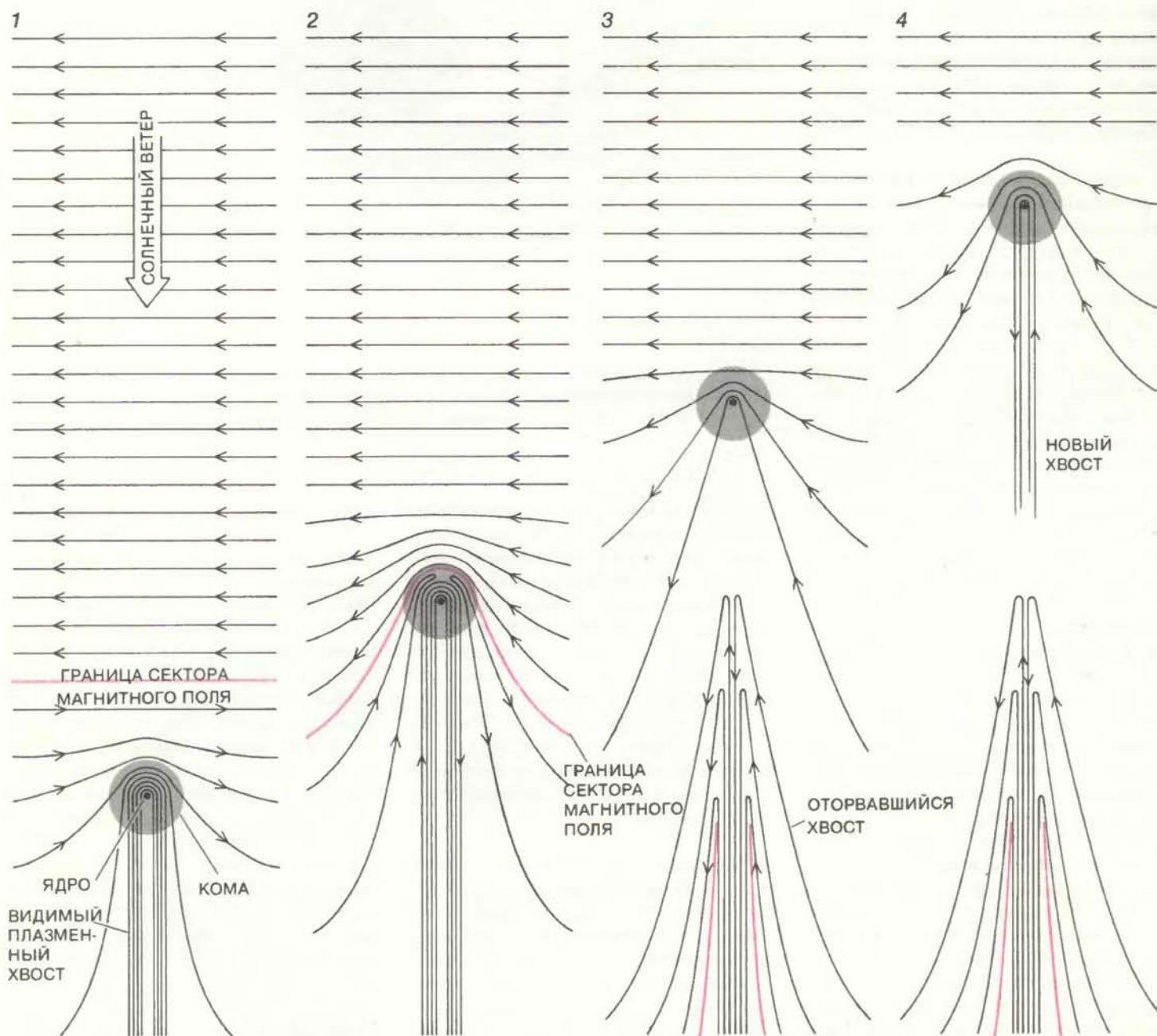
Отсоединение хвоста, согласно нашей модели, происходит, когда коме-

та пересекает границу сектора магнитного поля, т. е. примерно каждую неделю. Экспериментально это подтверждается высокой степенью корреляции между процессами отрыва и моментами пересечения кометой границ секторов. Обнаружено также хорошее согласие между наблюдаемыми изменениями морфологической структуры хвоста в процессе отсоединения и ожидаемыми, исходя из нашей модели. Были предложены и другие механизмы, объясняющие отсоединение хвоста, однако модель, основанная на разрыве и пересоединении магнитных силовых линий на гра-

нице сектора, по-видимому, наиболее жизнеспособна.

Описанный механизм отсоединения хвоста имеет свои «слабые места», которые должны быть прояснены в ходе ведущихся в настоящее время наблюдений за приближающейся кометой Галлея. Во-первых, приведенная выше макроскопическая модель отсоединения и эволюции плазменных хвостов перенасыщена фрагментарными экспериментальными данными. Общая картина построена на основе анализа изображений разных комет и собранных воедино данных, полученных разными методами

на различных обсерваториях и сильно зависящих от приборного исполнения, типа фотоэмульсии и времен экспозиции. Мы ожидаем, что сеть станций Службы крупномасштабных явлений (Large-Scale Phenomena Network, LSPN) Международной программы наблюдения кометы Галлея (International Halley Watch, IHW) поможет разрешить эту проблему. Целью службы является получение исчерпывающего набора всевозможных изображений кометы Галлея с хорошим временным и пространственным разрешением в течение ее полета в области, доступной наблюде-



ПЛАЗМЕННЫЙ ХВОСТ, образовавшийся в секторе с одной полярностью магнитного поля, отсоединяется при переходе кометы в сектор магнитного поля противоположной полярности. Когда силовые линии нового магнитного сектора приближаются к противоположно направленным силовым линиям кометного хвоста, «старые» линии разрываются и сразу же пересоединяются с силовыми линиями ново-

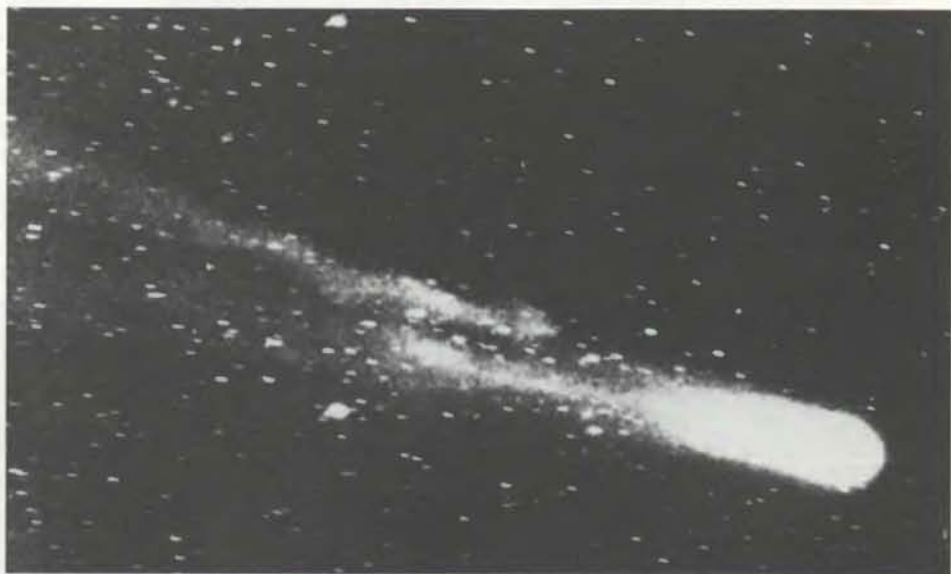
го сектора. «Старые» линии удерживают захваченные ими ионы, но они уже не связаны с кометой. Вновь образованные в атмосфере ионы, не имея магнитной связи с оторвавшимся хвостом, входят в состав нового плазменного хвоста с соответствующей новому сектору магнитного поля полярностью.

нию. Сеть наземных станций включает около 100 обсерваторий, оснащенных высококачественной широкоугольной фотоаппаратурой, способна фиксировать одновременно значительную часть плазменного и пылевого хвостов кометы. Обсерватории отслеживают полет кометы Галлея на всей небесной сфере, сначала в Северном полушарии при ее приближении к перигелию, а затем, после пересечения небесного экватора, в Южном полушарии, когда весной 1986 г. комета начнет вновь уходить в отдаленную часть Солнечной системы.

Чтобы получить непрерывную серию снимков, сделанных в течение достаточно большого периода времени, требуется кроме хорошей погоды равномерное распределение наблюдательных пунктов по поверхности земного шара. В Южном полушарии, большая часть которого занята океаном, на четырех островах (два в Тихом океане и по одному в Индийском и Атлантическом океанах) размещены передвижные телескопы, чтобы во время прохождения кометы в марте — апреле 1986 г. по небу Южного полушария не возникли пробелы в серии снимков.

При прохождении кометы Галлея должны наблюдаться как плазменный, так и пылевой хвосты. До перигелия оба хвоста будут направлены примерно в одном направлении, при удалении кометы от Солнца хвосты должны будут разойтись под большим углом друг к другу. Есть все основания полагать, что длина хвостов будет не меньше, чем в 1910 г. К сожалению, земным наблюдателям хвосты кометы на этот раз не покажутся столь длинными из-за неудачного ракурса и большого расстояния от Земли до кометы. На основании анализа фотографий кометы, сделанных в 1910 г., длину хвоста можно оценить в несколько десятых долей астрономической единицы (1 а.е. равна 150 млн. км). В тот год в результате исключительно удачного взаиморасположения Земли и кометы и благоприятных условий проецирования кометы на небо видимая с Земли угловая длина кометного хвоста достигала 50° . Предполагается, что видимая угловая длина хвоста в 1986 г. будет составлять примерно $10 - 15^\circ$.

НАБЛЮДЕНИЕ кометы Галлея семью станций Службы крупномасштабных явлений будет дополнено ее фотографированием широкоугольными камерами с борта космического корабля шаттл, полет которого предусмотрен программой НАСА «Астро-1». В марте 1986 г. в



ОТСОЕДИНЕНИЕ хвоста кометы Галлея сфотографировано при ее предыдущем сближении с Землей в 1910 г. Отсоединение впервые было описано Э. Барнардом в 1899 г., высказавшим правильное предположение о том, что это явление вызвано взаимодействием кометы с межпланетной средой. Он считал, что необходимо часто фотографировать кометы, чтобы проследить динамику этих явлений. Серия фотографий, демонстрирующая процесс отсоединения хвоста кометы Галлея, собрана из снимков 1910 г., сделанных 6 июня в Йоркской обсерватории (вверху) и в Гонолулу (в центре), 7 июня в Бейруте (внизу).

	КОМЕТА ДЖАКОБИНИ — ЦИННЕРА	КОМЕТА ГАЛЛЕЯ				
	НАСА	СССР		ЕВРОПЕЙСКОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО	ЯПОНИЯ	
КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ	ICE	«Вега-1»	«Вега-2»	«Джотто»	«Sakigake»	«Suisei»
ДАТА ЗАПУСКА	АВГУСТ 1978 Г. (ДЕКАБРЬ 1983 Г.)	ДЕКАБРЬ 1984 Г.	ДЕКАБРЬ 1984 Г.	ИЮЛЬ 1985 Г.	ЯНВАРЬ 1985 Г.	АВГУСТ 1985 Г.
ДАТА ВСТРЕЧИ:	11 СЕНТЯБРЯ 1985 Г.	6 МАРТА 1986 Г.	9 МАРТА 1986 Г.	13 МАРТА 1986 Г.	8 МАРТА 1986 Г.	7 МАРТА 1986 Г.
РАССТОЯНИЕ ПРО- ЛЕТА ОТ ЯДРА, КМ	8 000 (К ХВОСТУ)	10 000 (К СОЛНЦУ)	3 000 (К СОЛНЦУ)	500 (К СОЛНЦУ)	$4 \cdot 10^6$ (К СОЛНЦУ)	$2 \cdot 10^5$ (К СОЛНЦУ)
СКОРОСТЬ ПРОЛЕТА, КМ/С	21	80	77	69	74	75
РАССТОЯНИЕ ОТ СОЛНЦА, КМ	$1,55 \cdot 10^8$	$1,185 \cdot 10^8$	$1,245 \cdot 10^8$	$1,335 \cdot 10^8$	$1,215 \cdot 10^8$	$1,20 \cdot 10^8$
РАССТОЯНИЕ ОТ ЗЕМЛИ, КМ	$7,05 \cdot 10^7$	$1,74 \cdot 10^8$	$1,635 \cdot 10^8$	$1,470 \cdot 10^8$	$1,665 \cdot 10^8$	$1,71 \cdot 10^8$
КОМЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ	8	13	13	10	3	1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ встреч космических аппаратов с кометами Джакобини—Циннера и Галлея. 11 сентября 1985 г. спутник НАСА ICE пересек плазменный хвост кометы Джакобини—Циннера, передав ценные данные о его структуре. (ICE был выведен на сложную околоземную

орбиту в августе 1978 г. в основном для изучения солнечного ветра; в декабре 1983 г. для встречи с кометой Джакобини—Циннера его орбита была изменена). Этот аппарат в марте 1986 г. пролетит мимо кометы Галлея с солнечной стороны.



ВЕЛИКАЯ КОМЕТА 1843 г. была самым заметным объектом в небе Северного полушария. На литографии она запечатлена в том виде, в каком ее наблюдал художник над Парижем 19 марта 1843 г. Эта комета, по-видимому наиболее яркая за последние два столетия, с тех пор не наблюдалась.

Ее хвост простирался примерно на 300 млн. км, что превышает расстояние от Марса до Солнца. Художник зарисовал, вероятно, яркий пылевой хвост. Плазменный хвост, скорее всего, наложился на пылевой и не был зафиксирован из-за низкой яркости.

течение недели камеры будут получать изображение кометы каждые шесть часов, а когда к комете приблизятся советский космический аппарат «Вега-2» и аппарат Европейского космического агентства «Джотто», — каждые полчаса.

Вторым слабым местом нашей модели является недостаточность данных о локальных физических параметрах кометной плазмы и магнитного поля хвоста, т. е. именно тех областей, куда и посланы шесть космических кораблей. Один из них, ICE, уже встретился в сентябре 1985 г. с кометой Джакобини—Циннера. Пять других полетят к комете Галлея в марте 1986 г., а в это время ICE будет контролировать параметры солнечного ветра, находясь в нем перед кометой. До этих полетов не проводилось ни одного прямого измерения микроскопических параметров кометы. Мы не имели точных значений магнитного поля, температуры, плотности, состава, массовых скоростей ни для одной кометной плазмы. А между тем лишь знание этих параметров поможет установить, какие процессы определяют структуру кометы и динамику ее изменения, и подсказать, насколько быстрые изменения можно ожидать в кометах.

11 сентября 1985 г. космический аппарат ICE пересек плазменный хвост кометы Джакобини—Циннера на расстоянии около 8000 км от ядра. Проведенные им измерения подтвердили модель кометной структуры, следующую из предложенной Альфвену в 1957 г. теории: характерную форму увлеченного кометой магнитного поля, наличие двух долей хвоста и создающего их электрического тока. Научная аппаратура на борту ICE зарегистрировала удивительно сильную турбулентность при пересечении области фронта головной ударной волны. Этот космический эксперимент преподнес также два главных сюрприза: наблюдались не все ожидаемые признаки ударной волны, и дважды были зарегистрированы непредусмотренные имеющимися моделями высокоэнергичные ионы. Наблюдение головной ударной волны привело некоторых ученых к предположению, что при определенных условиях кометная плазма может плавно замедлять солнечный ветер, вместо того чтобы резко затормаживать его, как это предсказывалось классической моделью. Не подлежит никакому сомнению, что дальнейшее тщательное изучение данных, полученных с помощью космического аппарата ICE, поможет построению адекватной модели кометных хвостов.

ВЫБОР момента старта спутников к комете Галлея производится таким образом, чтобы свести к минимуму стартовую энергию, необходимую для сближения с кометой. Встречи с кометой планируются вблизи точки пересечения плоскости эклиптики с кометной орбитой. Такой выбор места встречи дает возможность воспользоваться орбитальным моментом Земли, который передается спутникам при запуске и увеличивает тем самым их стартовый импульс. Наиболее «дерзкая» миссия у космического аппарата «Джотто», который, пролетая на расстоянии всего лишь 500 км от ядра, попадает в область высокой концентрации кометной пыли. Лобовая поверхность спутника защищена двухслойным экраном. Предполагается, что первый слой должен раздробить и замедлить частицы, а второй — предохранить от попадания пылевых частиц в рабочие части аппарата. Чтобы спутник мог подойти так близко, потребуются точные данные о положении ядра кометы. Эти данные предоставит СССР, согласно международному соглашению «Лощман» (Pathfinder). Данные о положении ядра, зарегистрированные камерами советских космических зондов «Вега-1» и «Вега-2», будут передаваться под эгидой Консультативного совещания космических агентств (Inter-Agency Consultative Group), включающего четыре космических агентства и программу INW. «Вега-1» и «Вега-2» пролетят на расстоянии около 10 000 км от ядра; «Вега-2», возможно, будет направлена ближе к нему. Аппараты «Вега» и «Джотто» передадут первые фотографии ядра кометы. Японские космические зонды «Sakigake» («Пионер») и «Suisei» («Комета»), оставаясь в достаточном отдалении от ядра кометы, чтобы избежать случайного попадания кометных осколков, предоставят дополнительные данные о комете Галлея. Космический аппарат «Sakigake», находясь на расстоянии 1 млн. км или более от кометы по направлению к Солнцу, будет измерять параметры солнечного ветра, натекающего на комету. «Suisei» проникнет в кометную атмосферу на расстоянии примерно 200 000 км от ядра, чтобы получить данные о плотности и скорости кометной плазмы. Планируется, что будут получены также ультрафиолетовые изображения кометной атмосферы.

Огромные усилия ученых, направленные на изучение комет Галлея и Джакобини—Циннера, должны разрешить многие проблемы кометной астрофизики, однако по мере поступления новой информации будут воз-

никать все новые и новые вопросы, связанные в первую очередь с долговременными изменениями в кометах. С помощью спутников, пронесшихся через атмосферу кометы, можно будет получить лишь серию моментальных снимков и измерений в области траекторий их движения. Чтобы глубже разобраться в природе кометных хвостов, необходимо получать непрерывную информацию о жизни кометы. Проект Comet Rendezvous and Asteroid Flyby, осуществление которого планируется НАСА на начало 90-х годов, должен предоставить необходимые данные. Космический аппарат, приблизившись к комете Вилда-2 в 1995 г., должен будет следовать за нею в течение двух с половиной лет, собирая ценную информацию. Если этот план увенчается успехом, то будет сделан следующий важный шаг в исследовании природы комет.

Издательство
МИР
предлагает:

АНОРГАНИКУМ

В 2-х томах, 4-х частях
Под редакцией Л. Кольдитца
Перевод с немецкого

Книга из серии учебных лабораторных руководств типа «Органикума» (М.: Мир, 1979) и «Аналитикума» (в русском издании — «Руководство по аналитической химии». — М.: Мир, 1975). В ГДР книга выдержала 11 изданий. Посвящена неорганической химии с изложением основ физической и аналитической химии. Приведен соответствующий лабораторный практикум.

Книга предназначена для студентов и преподавателей высших и средних химических и химико-технологических учебных заведений.

1984, Т.1 — 43 л. Цена 2 р. 50 к.
Т.2 — 41 л. Цена 2 р. 40 к.



Применения обращения волнового фронта

«Обращенные во времени» световые волны можно использовать для улучшения качества лазерного пучка, компенсации атмосферной турбулентности, слежения за движущимися спутниками, кодирования и декодирования сообщений и распознавания образов

ДЭВИД М. ПЕППЕР

СОВЕТСКИЙ физик Б. Я. Зельдович и его коллеги, проводя эксперименты в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР в Москве, обнаружили в 1972 г. любопытное явление. Исследователи специально исказили мощный пучок красного света от импульсного рубинового лазера, пропустив его через матовую пластинку из стекла. Затем они направили искаженный пучок в длинную трубу с газообразным метаном, находящимся под высоким давлением. В соответствии с хорошо известным эффектом, называемым вынужденным рассеянием Мандельштама—Бриллюэна, пучок взаимодействовал с молекулами газа и отражался назад; газ работал, как зеркало, хотя и очень необычное. Сюрпризом для исследователей оказалось то, что отраженный пучок, пройдя назад через тот же участок матового стекла, оказался почти идеальным, неискаженным. Иначе говоря, приобретенные при первом прохождении через стекло искажения исчезали. (В случае обычного зеркала искажения отраженного пучка, напротив, лишь увеличились бы.) Поэтому отраженную назад волну можно, очевидно, считать «обращенной во времени» репликой падающей волны.

Словосочетание «обращенный во времени» выражает тот факт, что отраженный газом пучок несет именно те искажения, которые были внесены матовой пластинкой, но в обратном виде. При обратном прохождении через стекло неоднородности пластинки компенсируют те искажения, которые были внесены в пучок во время его прохождения в прямом направлении. Иначе говоря, если бы существовала возможность заснять падающий пучок на киноплёнку, обращенный во времени пучок можно было бы увидеть, прокручивая фильм в обратном направлении. Обращенные во

времени волны принято называть фазово-сопряженными или волнами с обращенным волновым фронтом. Технику их создания называют обращением волнового фронта (см. статью Б. Я. Зельдовича и В. В. Шкунова «Обращение волнового фронта» в журнале «В мире науки», 1986, № 2).

Существует множество заманчивых применений явления обращения волнового фронта. Например, высококачественный световой пучок можно пропустить через турбулентную атмосферу и, обратив его, заставить пройти назад точно по тому же пути; по возвращении к исходной точке пучок оказывается неискаженным. Такие пучки можно использовать для наведения на движущиеся объекты с целью слежения за ними, для обработки изображений, в оптических вычислительных системах, в интерферометрии, лазерных гироскопах, в системах волоконной связи и связи со спутниками, системах лазерного оружия и в фотолитографии. Обращающие волновой фронт «зеркала» сделали возможным, кроме того, создание нового типа лазерных резонаторов.

Получение «обращенного во времени» света

Существуют два стандартных метода создания обращенных волн: вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и четырехволновое смешение. После основополагающего эксперимента Зельдовича исследователи обнаружили, что обращения при вынужденном рассеянии Мандельштама — Бриллюэна можно добиться не только в сжатом газе, но и в целом ряде веществ. Такие вещества называют *нелинейными средами*. Этот термин используется здесь в специальном смысле: оптические свойства нелинейной среды в отличие от линейной меняются под действием све-

та. В число нелинейных сред входят полупроводники, кристаллы, жидкости, плазмы, жидкие кристаллы, аэрозоли и пары атомов.

Нелинейные среды используются и для четырехволнового смешения — метода, предложенного в 1977 г. Р. Хеллварсом из Южнокалифорнийского университета и впоследствии получившего развитие в работах А. Ярива из Калифорнийского технологического института и моих (в то время я тоже работал в этом институте), а также в работах Д. Блума, Г. Бьерклунда и П. Ляо из фирмы AT&T Bell Laboratories. В этом методе в нелинейной среде взаимодействуют четыре оптических пучка: три подаются на вход, а четвертый рождается в самой среде. Входные пучки — это пробный пучок, который требуется «обратить во времени», и два встречных пучка накачки, необходимые, чтобы сделать нелинейную среду «чувствительной». Процессы, приводящие к созданию четвертого, фазово-сопряженного выходного пучка, аналогичны процессам в традиционной голографии, где светочувствительную эмульсию освещают объектным и опорным пучками. Опорный пучок и свет от объекта, взаимодействуя, создают в эмульсии голограмму, т.е. трехмерную интерференционную картину. После проявления записанную статическую голограмму можно считать, освещая ее той же самой опорной волной. В результате реконструируется трехмерное изображение объекта.

При четырехволновом смешении нелинейная среда ведет себя как фотоэмульсия. Взаимодействие пробного (объектного) пучка с одним из пучков накачки (опорных пучков) наводит в среде пространственный профиль взаимного подчеркивания и компенсации волн (конструктивная и деструктивная интерференция), являющийся

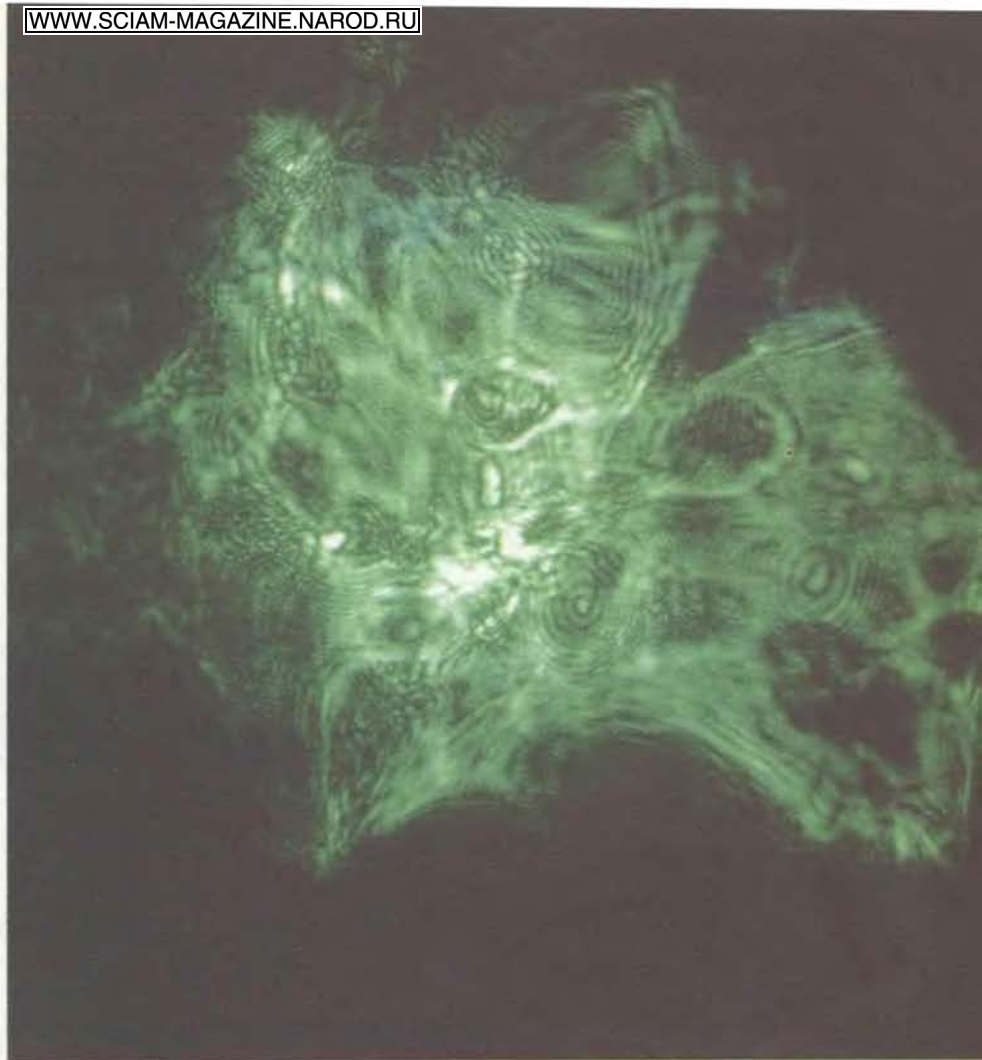
голограммой в реальном времени, или динамической голограммой. Выходящий обращенный пучок получается при считывании голограммы другой встречной опорной волной. На самом деле возникают две голограммы: каждый из пучков накачки, взаимодействуя с пробным пучком, записывает свою голограмму, от которой при считывании отражается другой опорный пучок.

Хотя оба метода — вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и четырехволновое смешение — обладают как преимуществами, так и недостатками, в каждом из них конечным результатом является возникновение обращающего волновой фронт зеркала — необычного зеркала, которое не является плоским, а имеет конечную толщину и которое возвращает «отражение» по тому же пути, который был пройден падающим пучком. И в том и в другом случае динамический характер нелинейной среды позволяет обращающему зеркалу откликаться на входные пучки, меняющиеся во времени. Читателю вряд ли удастся представить на основании приведенного описания, что он смог бы увидеть, заглянув в такое зеркало. (Ответ дан в конце статьи.)

Адаптивная оптика

Многочисленные применения обращения волнового фронта обязаны часто возникающей необходимости компенсировать статические и динамические искажения, которые встречаются в оптических системах. Эффективность работы мощных лазеров, систем слежения, сетей атмосферной

ОБРАЩАЮЩЕЕ ВОЛНОВОЙ ФРОНТ ЗЕРКАЛО способно скомпенсировать искажения, внесенные в изображение кошки. На обеих фотографиях изображение искажалось пропусканием через кусочек матированного стекла. Отражение изображения назад через тот же кусочек стекла посредством обычного зеркала давало неузнаваемое изображение (*верхняя фотография*). Отражение изображения назад через матированное стекло обращающим зеркалом, напротив, корректировало искаженное изображение (*нижняя фотография*). Это объясняется тем, что обращающее зеркало формирует пучок, распространяющийся обратно через искажающее стекло, как бы «обращенный во времени»: его траектория точно повторяет траекторию исходного пучка в обратном направлении, компенсируя тем самым искажения. Эксперимент с использованием аргонового лазера был проведен Дж. Файнбергом из Южнокалифорнийского университета.



оптической связи и фотолитографического оборудования значительно снижается из-за возникающих в них шумов. Они же являются и причиной снижения эффективности систем лазерного вооружения. В борьбе с шумами могут помочь как четырехволновое смешение, так и вынужденное рассеяние Манделъштама — Бриллюэна.

Во многих случаях применение обращения волнового фронта в указанных областях основано на так называемой двухпроходной геометрии, т.е. построении оптических систем по такой схеме, в которой лазерный пучок сопрягается по фазе и отражается так, что проходит через ту же среду второй раз. Отраженный пучок в такой схеме проходит точно по тому же пути, что и падающий в смысле «обращения во времени». В одном из примеров применения указанной геометрии

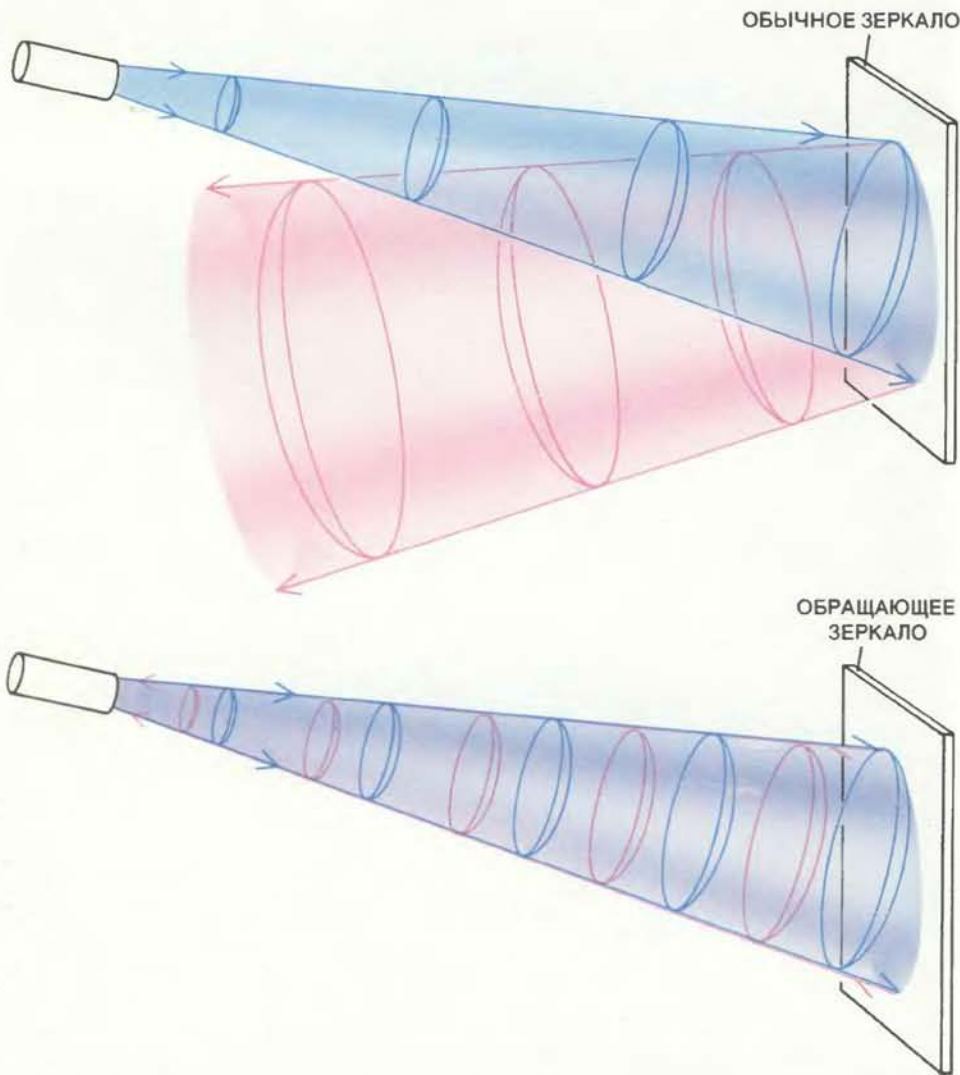
высоконаправленный свет мало-мощного затравочного лазера пропускается через усилитель, представляющий собой среду из сильно возбужденных атомов или молекул в газообразном или конденсированном состоянии. Проходя через усилитель, пучок «провоцирует» молекулы высвободить энергию в виде излучения. При этом пучок увеличивает свою мощность, но его направленность ухудшается: неоднородности усиливающей среды искажают пучок, так что он становится расходящимся. Искажения устраняются, если пучок перехватывается обращаемым волновой фронт зеркалом, установленным на конце усилителя. Когда фазовосопряженный пучок проходит через усилитель в обратном направлении, его движение, обращаемое движение исходного пучка, «занимает» искажающее воздействие среды. Выходящий

двухпроходный пучок является одновременно и мощным, и направленным*.

Существует ряд принципиальных и практических соображений, которые налагают определенные ограничения на физический размер усилителя, а значит, и на создаваемую им выходную мощность. Используя несколько усилителей в параллельной схеме и обращающее зеркало, можно не только компенсировать оптические искажения в каждом усилителе, но и «сфазировать», или синхронизировать, работу всех усилителей. Если излучение усилителей сфазировано, пиковая интенсивность выходящего пучка пропорциональна квадрату числа усилителей. Пиковая интенсивность, создаваемая набором усилителей, в которых фаза излучения беспорядочна, пропорциональна лишь числу усилителей. Принципиальная схема, предложенная советским академиком Н. Г. Басовым с сотрудниками в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР и Т. О'Меарой с коллегами в Хьюзской научной лаборатории, недавно экспериментально продемонстрирована Д. Роквеллом и К. Джулиано там же в Хьюзе.

Другим примером двухпроходной геометрии, в котором тоже требуется пучок от мало-мощного затравочного лазера, служит самонаведение излучения. В этом случае, однако, затравочный лазер светит прямо на объект, например на мишень, содержащую смесь дейтерия и трития (изотопы водорода), в установке для термоядерного синтеза. Часть рассеянного мишенью света проходит через расположенный рядом усилитель, который увеличивает мощность пучка, проходящего через него. Обращаемое зеркало на выходе усилителя создает интенсивный обращенный во времени пучок, который направляется обратно на мишень. Если бы пучок обладал достаточной мощностью, ядра в мишени могли бы сливаться с высвобождением полезной энергии.

Самонаведение можно с успехом применять и в других ситуациях: мишень для термоядерного синтеза можно заменить на орбитальный спутник. При освещении спутника та часть рассеянного им света, которая, возвращаясь, собирается обращаемой лазерной системой, может быть усилена и послана обратно на спутник. В той незначительной мере, в ка-



СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ обращаемого и обычного зеркал. Если на то и на другое зеркало направить световой пучок, то обычное зеркало (вверху) просто отразит его, обращаемое же зеркало (внизу) независимо от угла падения исходного пучка сформирует сходящийся, «обращенный во времени» пучок.

* Этот метод впервые был предложен и практически реализован в 1972 г. сотрудниками Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР В. И. Рагульским, О. Ю. Носачем и их коллегами. — *Прим. перев.*

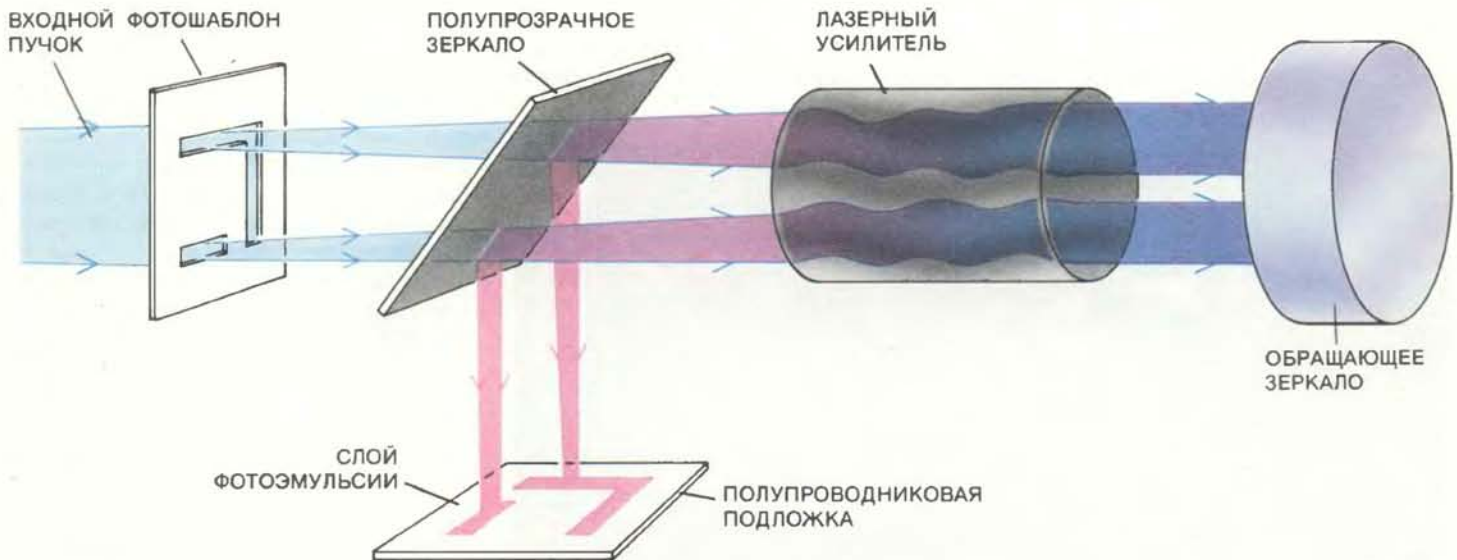
кой меняются помехи атмосферы и положение спутника за время прохождения света туда и обратно, отражающее зеркало будет не только компенсировать атмосферную турбулентность (явление, вызывающее «мерцание» звезд), но также позволит следить за спутником, непрерывно удерживая на нем освещающий пучок. Спутник в свою очередь может направить усиленный лазерный пучок

на ракету и при достаточной интенсивности излучения вывести ее из строя. Подобные схемы для использования в системах лазерного оружия предлагались и интенсивно исследовались с начала 70-х годов.

Безлинзовая оптика

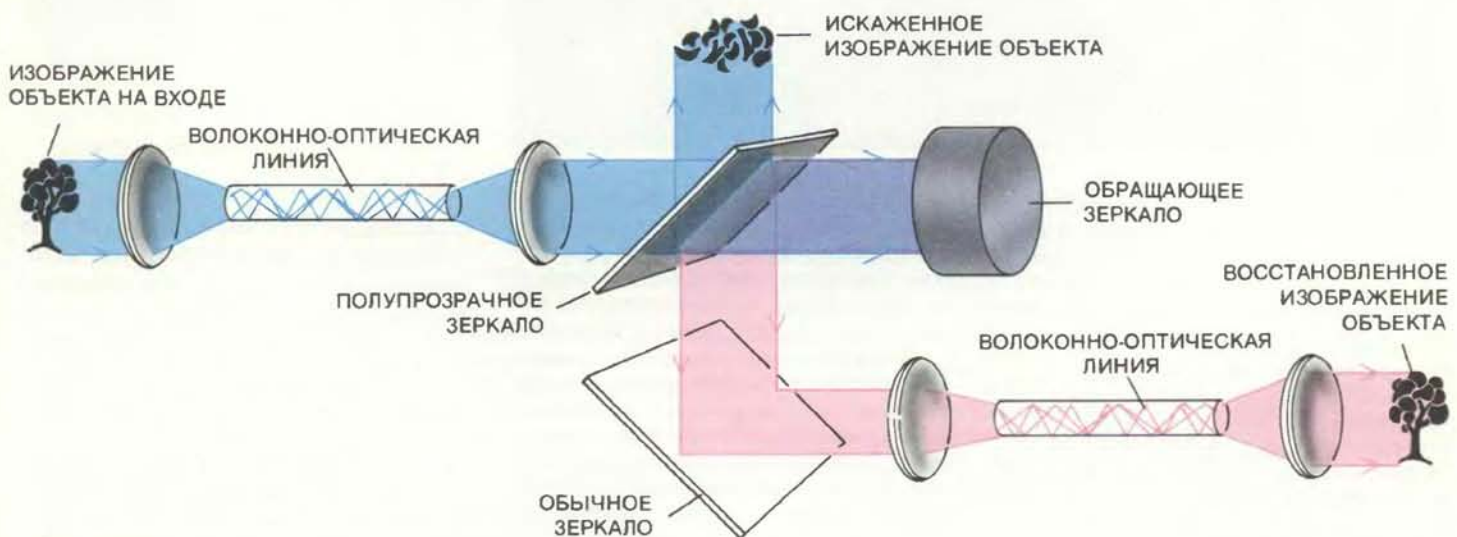
Во многих оптических системах используется большое число линз, что

создает трудности в настройке и юстировке таких систем. Для устранения этих трудностей предлагались различные схемы с обращением волнового фронта. Их можно применить, например, для того, чтобы перенести данное двумерное распределение интенсивности из одного сечения в другое. Именно эта задача является ключевой в фотолитографии — технике, которая применяется в про-



ФОТОЛИТОГРАФИЮ — процесс перенесения двумерного изображения в пространстве с одной плоскости на другую — можно осуществить без оптических линз, используя отражающее волновой фронт зеркало. Этот метод можно использовать в технологии изготовления микросхем для перенесения изображения контуров микросхемной схемы с фотошаблона на полупроводниковую подложку, покрытую фотоэмульсией. Световой пучок (голубой) от лазера проходит через фотошаблон, полупрозрачное зеркало и лазерный усилитель. Хотя усилитель повышает мощность пучка, неоднородности усиливающей среды искажа-

ют его. После обращения пучок (красный) проходит назад через усилитель, компенсируя искажения и восстанавливая структуру исходного пучка. Полупрозрачное зеркало отражает усиленное изображение рисунка на фотошаблон, экспонируя его на светочувствительную эмульсию. Система компенсирует оптические aberrации, имеет высокое разрешение по большому полю зрения, устраняет спекл-эффект, минимизирует уширение пучка и исключает необходимость физического контакта с подложкой.



ИСКАЖЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ можно устранить, используя отражающее зеркало. Искажения возникают из-за того, что изображение (слева) вдоль волокна передается множеством оптических мод: каждой моде соответствует определенный луч, распространяющийся в волокне по ломаной траектории (голубой). Поскольку все мо-

ды проходят разные пути за время, пока они достигнут конца волокна, их синхронизация нарушается, вследствие чего изображение искажается (в центре). Изображение можно восстановить, если обратить его волновой фронт и пропустить через идентичное волокно (красный).

изготовлении электронных микросхем и посредством которой изображение с фотошаблона, несущего контур микросхемы, переносится на участок поверхности полупроводника, покрытой фотоэмульсией. (Прямой физический контакт фотошаблона с подложкой может быть нежелательным.) Осуществимость такой передачи изображения была продемонстрирована М. Левенсоном и его коллегами в Исследовательской лаборатории фирмы IBM в Сан-Хосе и совсем недавно М. Говером в Лаборатории им. Резерфорда в Эпплтоне (Великобритания). Свет от лазера проходит через

фотошаблон с рисунком, полупрозрачное зеркало и после этого через усилитель. Интенсивность пучка увеличивается, но одновременно в пучок вносятся искажения. Получившееся изображение «отражается» обращающим волновой фронт зеркалом и направляется назад через усилитель. Обращенный во времени пучок является и мощным, и неискаженным. Отразившись от полупрозрачного зеркала, он экспонирует фотоэмульсионный слой, воспроизводя на нем точный контур исходного рисунка микросхемы. Система с обращением волнового фронта обладает преимуще-

ствами перед традиционными методами, такими, как компенсация оптических аберраций.

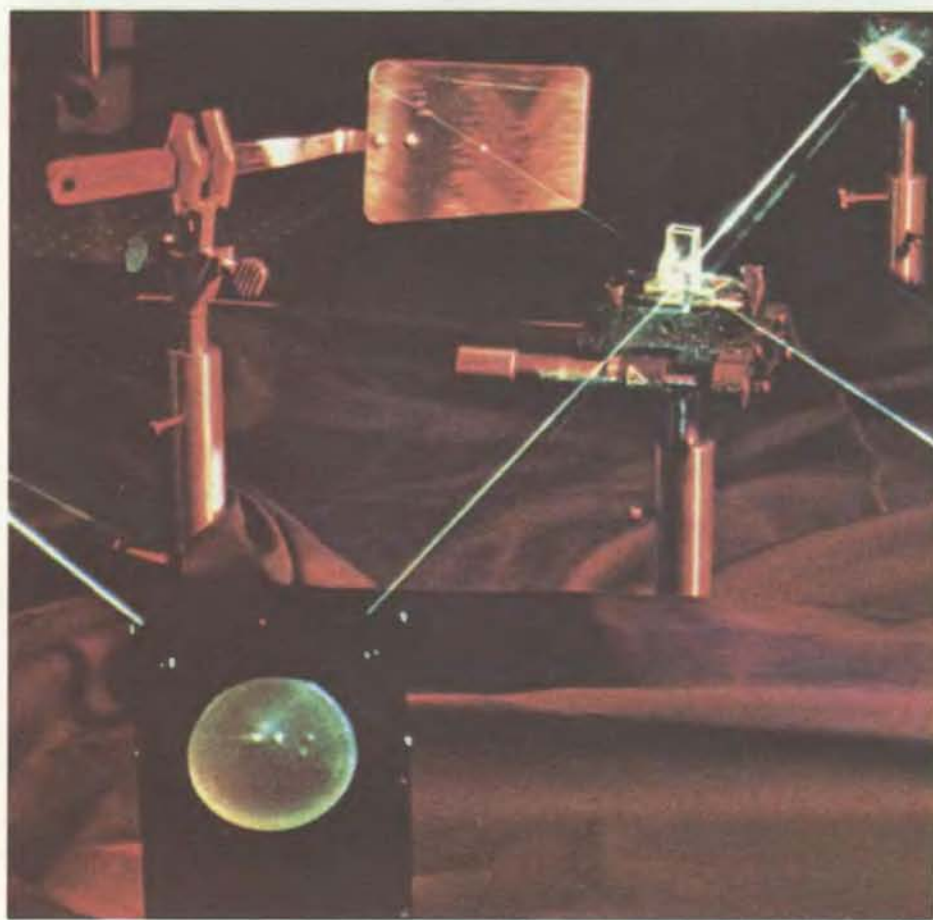
Схемы безлинзовой оптики с обращением волнового фронта применимы и для других целей. Одна из них — устранить искажения, вносимые волоконно-оптическим каналом. Такие искажения возникают по следующей причине. Представим, что трехмерное изображение (скажем, дерева) передается сквозь плоское оконное стекло. Качество изображения, видимого через окно, практически не снижается. Если то же оконное стекло заменить на длинное оптическое волокно, изображение становится неузнаваемым уже через несколько сантиметров. Это объясняется тем, что изображение дерева переносится большим числом мод, каждой из которых соответствуют свои лучи, зигзагами бегущие по волокну. Поскольку все моды волокна они рассинхронизованы во времени. (Фазовые соотношения между амплитудами мод не такие, как были на входе в волокно.) Иначе говоря, оптическое волокно как бы «перемешивает» изображение подобно матовому стеклу.

Изображение можно восстановить, если его обратить и пропустить назад через тот же или другой, идентичный кусок волокна. Эта возможность, на которую первым указал Ярив, была с успехом продемонстрирована Г. Данингом и Р. Линдом из Хьюзской научной лаборатории и затем недавно Б. Фишером и Ш. Стернкларом из Технологического института в Израиле. Хотя они работали с двумерными изображениями, схема в принципе позволяет получить тот же результат и при передаче через волокно трехмерных изображений.

Резонаторы с обращающим волновой фронт зеркалом

Как изменится работа лазера, если одно или оба его зеркала заменить на обращающее, сформировав так называемый резонатор с обращающим волновой фронт зеркалом? Резонатор — это полость, которая служит для усиления звуковой или электромагнитной волны. Он обычно представляет собой длинную, заполненную усиливающей средой (твердотельной или газообразной) трубку, которая с обоих концов замкнута хорошо полированными полупрозрачными зеркалами. Выходное лазерное излучение формируется светом, прошедшим сквозь одно из зеркал.

В 1978 г. группа ученых Калифорнийского технологического института, возглавляемая Яривом, в которую



«ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ КУХОННОЙ ЛОПАТОЧКИ» состоит из отражающего зеркала (лопаточки) и обращающего зеркала (кристалл в месте пересечения лучей). Обычный лазер состоит из длинной трубки, закрытой с обеих сторон хорошо полированными зеркалами. Трубка, как правило, заполнена усиливающей средой (сильно возбужденным газом или твердым телом). Лазер на основе лопаточки не нуждается в усиливающей среде, потому что требуемое усиление обеспечивается обращающим зеркалом. Усиление достигается накачкой, или возбуждением прямоугольного кристалла двумя лазерными пучками, называемыми опорными или пучками накачки. Один из пучков накачки виден на фотографии в нижнем левом углу; он отражается зеркалом (зеленый диск) к обращающему зеркалу. Часть пучка поглощается кристаллом; основная же часть проходит к клиновидному зеркалу в правом верхнем углу. Пучок, отраженный этим зеркалом, становится другим пучком накачки. После того как кристалл поглотит достаточно энергии встречных волн накачки, он будет излучать в направлении любой ближающей поверхности, расположенной поблизости, как если бы между кристаллом и этой поверхностью была усиливающая среда. Вследствие этого вдоль линии от лопаточки к кристаллу генерируется лазерный пучок. Если бы лопаточка перемещалась, обращающее зеркало отслеживало бы ее положение, удерживая пучок на поверхности лопаточки. Лазерный пучок выводится через кристалл (справа). Эксперимент был выполнен Файнбергом и Р. Хеллварсом в Южнокалифорнийском университете.

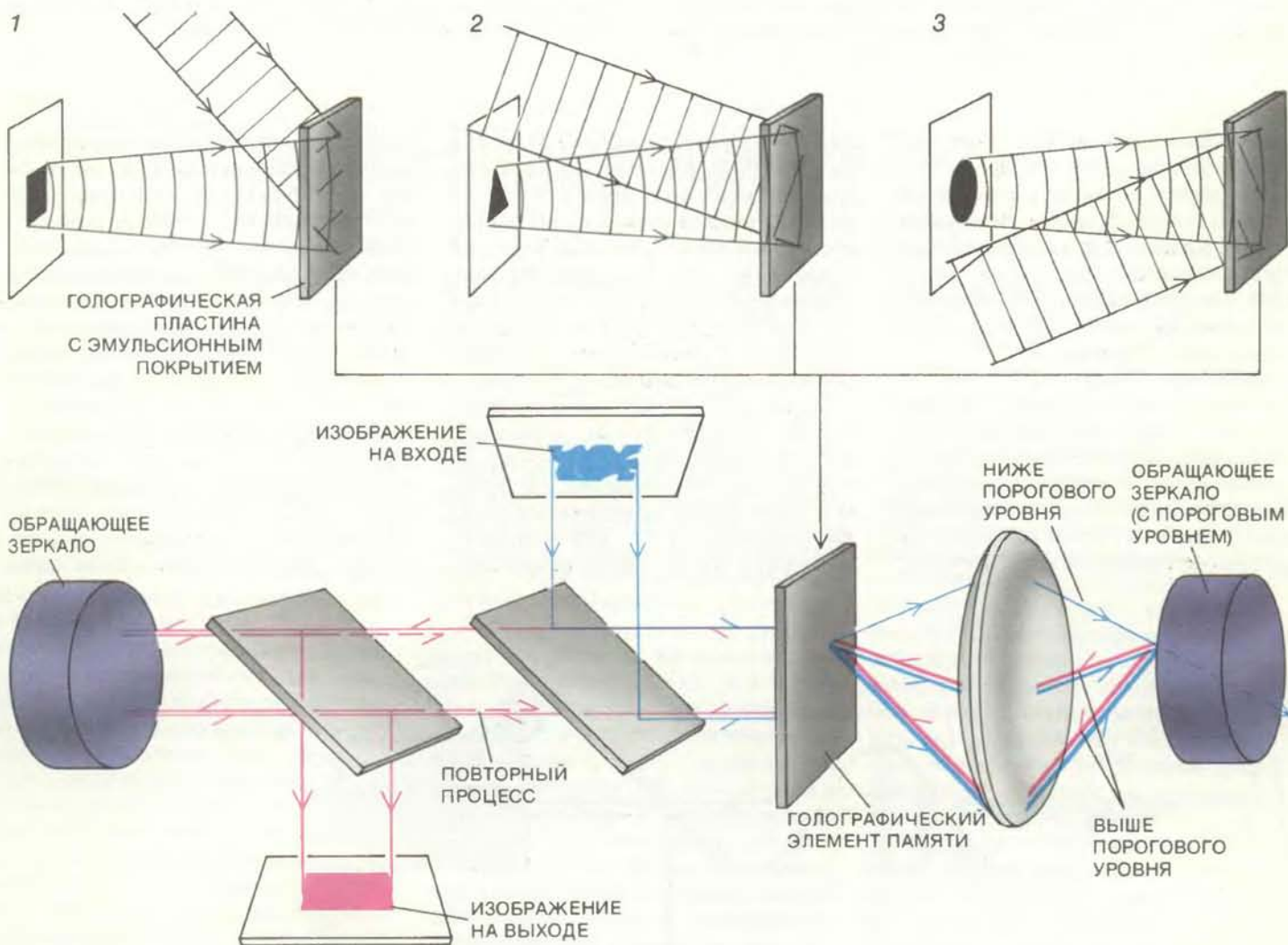
вошли Дж. Ау-Йюнг, Д. Фекете и я, изучили этот вопрос. В процессе нашей работы мы сделали первый импульсный лазер с обращающим зеркалом*. Усиливающим элементом служил рубиновый стержень. На одном конце стержня мы поместили обычное зеркало, на другом — фазово-сопрягающее. Второе зеркало, работающее на принципе четырехволно-

вого смешения, представляло собой заполненную сероуглеродом кювету; волны накачки создавались другим импульсным рубиновым лазером.

Было обнаружено, что резонатор с обращающим зеркалом обладает уникальными свойствами. Наиболее значительное его свойство, пожалуй, состоит в том, что фазово-сопрягающее зеркало может компенсировать статические и динамические aberrации, возникающие внутри резонатора из-за несовершенства оптических элементов, или, например, динамические возмущения, обусловленные тепловыми или механическими нагрузками. Поэтому резонатор с об-

ращающим зеркалом снимает запасенную в лазерной среде энергию с высокой эффективностью. Более тонкий эффект связан с понятием, называемым «устойчивостью резонатора». Способность обычного резонатора концентрировать энергию проявляется лишь при определенных соотношениях между длиной волны излучения, длиной собственного резонатора и кривизной зеркал. Для резонаторов с обращающим зеркалом таких ограничений нет.

Свойства резонаторов с обращающими зеркалами привлекают внимание многих исследователей, в том числе ученых научных лабораторий в



АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ способна распознать два изображения, имеющие общие черты. Элемент памяти формируется при освещении фотозмульсии опорным пучком, пропущенным через транспарант с изображением квадрата (вверху слева), благодаря чему в пленке записывается голограмма, или интерференционная картина. На том же слое эмульсии процесс повторяется с треугольником и кругом. Угол падения опорного пучка каждый раз меняется, чтобы иметь возможность различать изображения. Пластина с эмульсией (теперь голографический элемент памяти) обрабатывается и помещается между двумя обращающими зеркалами (внизу). Изображение, которое необходимо распознать (изображенный здесь несколько искаженный квадрат), отражается полупрозрачным зеркалом на эмульсию (голубой). Все лучи, которые в опознаваемом

квадрате соответствуют лучам одной из хранимой в пленке голограмм, складываясь, дают сильный выходной пучок (толстая линия); если соответствия лучей нет, выходной пучок получается слабее (линия средней толщины и тонкая линия). Сильный и средний выходные пучки отражаются обращающим зеркалом справа (красный). Слабый выходной пучок, однако, недостаточно мощен для возбуждения обращения и проходит сквозь обращающее зеркало (голубой пучок справа). Таким образом отбираются показатели «квадратности». После второго обращения сильного и среднего выходных пучков левым обращающим зеркалом процесс повторяется. Последующие итерации дают на выходе квадрат. Иначе говоря, система «распознала», что входным было изображение неточного квадрата, а не круга или треугольника.

* В СССР аналогичные работы были независимо начаты в 1978 г. С. А. Лесник, М. С. Соскиным и А. И. Хижняком в Киеве и И. М. Бельдюгиным, М. Г. Галушкиным, Е. М. Земсковым в Москве. — Прим. перев.



АТМОСФЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ компенсируется оптическим фазовым сопряжением. Лазерный свет, пройдя сто-метровую трассу в атмосфере, образовал сильно искаженное пятно (последовательно на трех фотографиях слева), которое меняется в пространстве и во времени. (Из-за наличия в атмосфере турбулентности звезды нам кажутся мерцающими, а объекты, наблюдаемые через воздух над костром или над автострадой в горячий полдень, мы ви-

дим слегка размытыми и колеблющимися.) Когда пучок был обращен и послан обратно через атмосферу, восставливалось почти идеальное качество пятна (справа). Обработанные видеопроцессором и кодированные цветом фотографии были получены с выдержкой в двухтысячную долю секунды. Авторы эксперимента Г. Даннинг и Р. Линд из Хьюзской научной лаборатории.

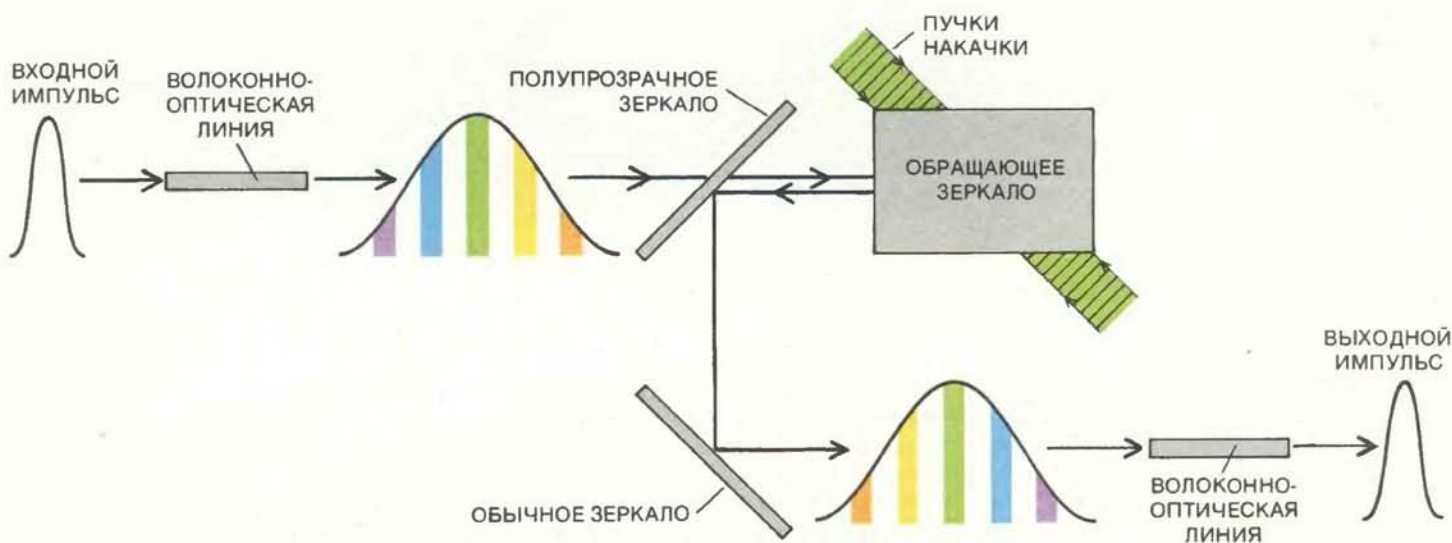
Хьюзе, Калифорнийского технологического института и Станфордского университета, а также ученых в Советском Союзе, Франции, Великобритании и Канаде. Для изучения свойств указанных резонаторов в них используют как четырехволновое смешение, так и вынужденное рассеяние Манделъштама — Бриллюэна.

Например, Линд и Д. Стил (в то время работавшие в Хьюзе) недавно создали непрерывно генерирующий лазер с обращающим волновой фронт резонатором. В качестве сопрягающего фазу зеркала они использовали кювету сантиметровой толщины, наполненную парами натрия, просвечи-

ваемую опорными волнами от лазера на красителе. Внесение матовой стеклянной пластинки внутрь резонатора фактически не влияло на работу системы: она давала довольно хороший пучок даже при перемещении пластинки по резонатору. Та же матовая пластинка внутри того же лазера на красителе в стандартном варианте полностью прекращала генерацию.

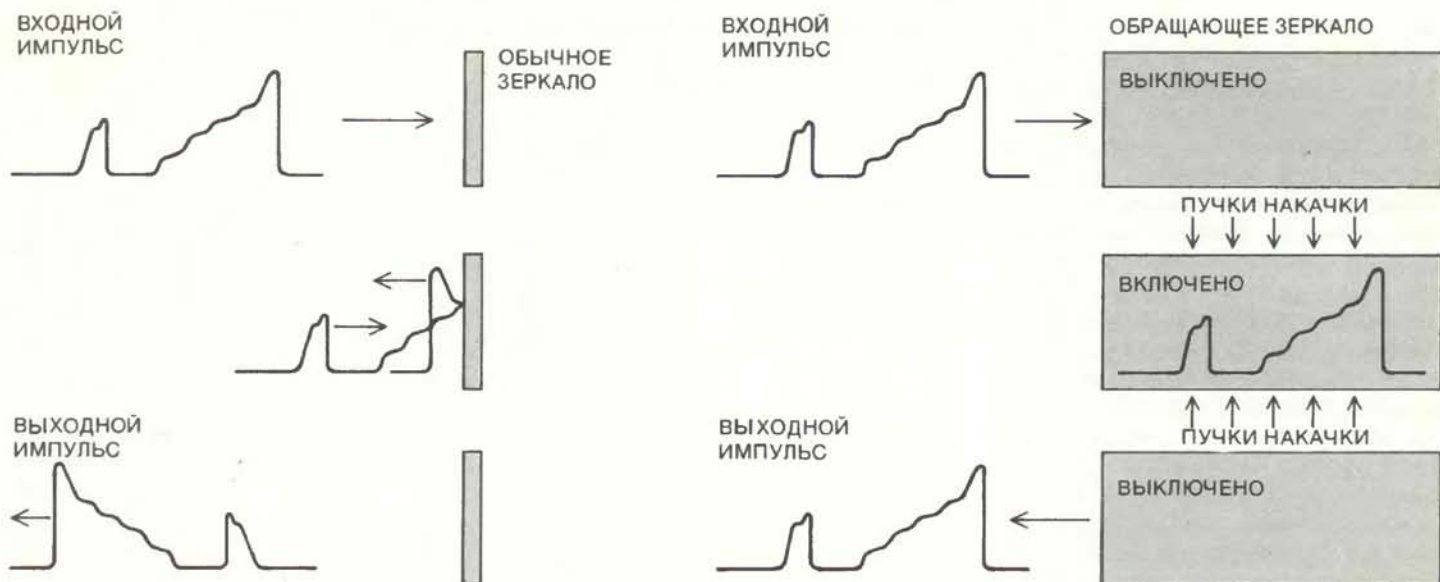
Особенно интересную версию резонатора с обращением волнового фронта можно сделать на основе четырехволнового смешения. Поскольку в этом случае применяются сразу два опорных пучка, интенсивность выходного пучка может превышать

интенсивность пробного пучка на входе. Иначе говоря, при четырехволновом смешении можно получить оптическое усиление. Такой четырехволновый элемент называют усиливающим обращающим зеркалом. Как результат, даже «пустой» резонатор, состоящий лишь из усиливающего, обращающего и обычного зеркал, можно заставить излучать; в усиливающей среде здесь нет необходимости. Кроме того, поскольку обращающее зеркало отражает весь свет назад к источнику, генерация излучения будет иметь место даже при смещении обычного зеркала. Конструкция подобного прибора впервые была пред-



ВРЕМЕННОЕ УШИРЕНИЕ ИМПУЛЬСА может быть скомпенсировано обращающим зеркалом. Уширение возникает из-за того, что различные частотные составляющие импульса (изображены разными цветами) распределяются в среде с несколько отличающимися скоростями. Четырехволновое обращающее зеркало (накачиваемое на центральной частотной компоненте импульса), которое помещено в середине пропускающего импульс волоконно-оптического ка-

беля, перегруппирует импульс таким образом, что более медленные компоненты попадают во вторую половину кабеля первыми. По мере распространения в оставшейся части кабеля более быстрые компоненты будут поэтому догонять лидирующую (более медленную) часть импульса: в результате импульс сужается и через кабель можно пропустить больше информации.



ВРЕМЕННОЕ ОБРАЩЕНИЕ формы импульса достигается посредством отражающего зеркала. Обычное зеркало (слева) сохраняет при отражении временной ход импульса. Обращающее зеркало (справа) обратит временной ход им-

пульса, если включить зеркало в момент, когда весь импульс «погружен» в среду. Зеркало приводится в действие приложением к нему двух опорных, или накачивающих, пучков.

ложена Яривом и мной, а с помощью Фекете была проверена его работоспособность; аналогичные результаты были получены Блумом, Ляо и Н. Экономой в фирме AT&T Bell Laboratories.

Возможно, самый оригинальный лазерный резонатор создали Дж. Файнберг из Южнокалифорнийского университета и Хеллварс. Перед отражающим зеркалом (кристалл титана бария, накачиваемый лазерным излучением) они поместили просто кухонную лопаточку. Резонатор с кристаллом и отражающей поверхностью лопаточки в качестве зеркал удалось создать благодаря усиливающим свойствам отражающего волновой фронт элемента. Между кристаллом и лопаточкой можно было наблюдать интенсивный световой пучок. Обращающее зеркало отслеживало любые перемещения лопаточки, удерживая пучок на ее поверхности. Вывод: перед усиливающим отражающим волновой фронт зеркалом нельзя появляться в блестящей одежде.

Обработка изображений

Общим для всех процессов, действующих на основе четырехволнового смешения, является оптическое взаимодействие пучков. С точки зрения теории отраженный пучок можно считать результатом алгебраического перемножения трех входных пучков (пробного и двух встречных пучков накачки); эффект перемножения обеспечивается нелинейной средой четырехволновой кюветы при взаимо-

действии пучков. Поэтому, если какие-то или все входные пучки кодированы путем нарушения однородности их пространственной структуры (пропусканием пучков через различные амплитудные или фазовые транспаранты) или путем изменения их интенсивности во времени (прерыванием), отраженный пучок будет кодирован таким образом, что его модуляция окажется пропорциональной произведению всех информационных модулирующих взаимодействующих пучков.

Работы, проведенные под руководством Ярива в Калифорнийском технологическом институте и Осаму Икеда в Токийском технологическом институте, показали, что даже через искажающую среду изображение можно перенести «за один проход», если в процессе четырехволнового смешения кодировать вместо пробного пучка опорные пучки. (Вспомним, что в рассматриваемой выше технике безлинзовой оптики изображение требовалось передавать по двум оптическим путям.) Допустим, что кто-то с помощью кинопроектора хочет передать своему другу на большое расстояние движущееся изображение (скажем, прыгающей в воду с вышки спортсменки). Из-за атмосферной турбулентности распознать передаваемое изображение спортсменки было бы невозможно.

Изображение можно передать, заменив проектор на устройство для четырехволнового смешения и снабдив того, кому посылается изображение, запрашивающим лазером-бакеном. Последовательность действия следу-

ющая. Адресат нацеливает лазер-бакен на корреспондента, передающего изображение. Искаженный пучок для лица, передающего изображение, по существу является тестирующим, или зондирующим, атмосферную турбулентность. Если свет отразит обычным четырехволновым зеркалом, отраженный пучок выправит атмосферные искажения и вернется к месту приема без информации. Однако, поставив на пути одной из опорных волн транспарант с изображением прыжка спортсменки, можно закодировать отражающее зеркало требуемой информацией. Такое отражающее зеркало отражает изображение прыжка. В результате необыкновенный отраженный во времени пучок доставляет адресату на лазер-бакен неискаженное изображение*.

Обработка изображений играет также важную роль в целом ряде областей, например в криминологии (для сравнения отпечатков пальцев), биологических науках и медицине (для классификации и идентификации различных классов клеток и их мутаций), при создании искусственного интеллекта, в робототехнике и системах автоматизации. Тонкие оптические методы могли бы упростить существующую

* Следует помнить, что внесение в отраженный пучок пространственной модуляции автоматически делает его необращенным во времени, так что он сохраняет локальную обращенность и способность компенсировать неоднородности среды лишь на небольшом расстоянии от отражающего зеркала. — *Прим. перев.*

технику сравнения. Так, для обработки изображений иногда применяются методы традиционной голографии. Соответствующая теория была разработана в 1963 г. А. Вандер-Люгтом из Мичиганского университета, который помимо этого разработал различные классы фильтров изображений и схем распознавания образов, использующих обычные статические голограммы, зарегистрированные в пленках эмульсий. Четырехволновое смещение, являющееся формой голографии в реальном масштабе времени, может увеличить возможности этой техники. Заметный вклад в данной области сделан Ж.-П. Уигнардом из Лаборатории им. Томсона во Франции, Файнбергом и Я. Яа из Исследовательской лаборатории фирмы Telecom в Австралии.

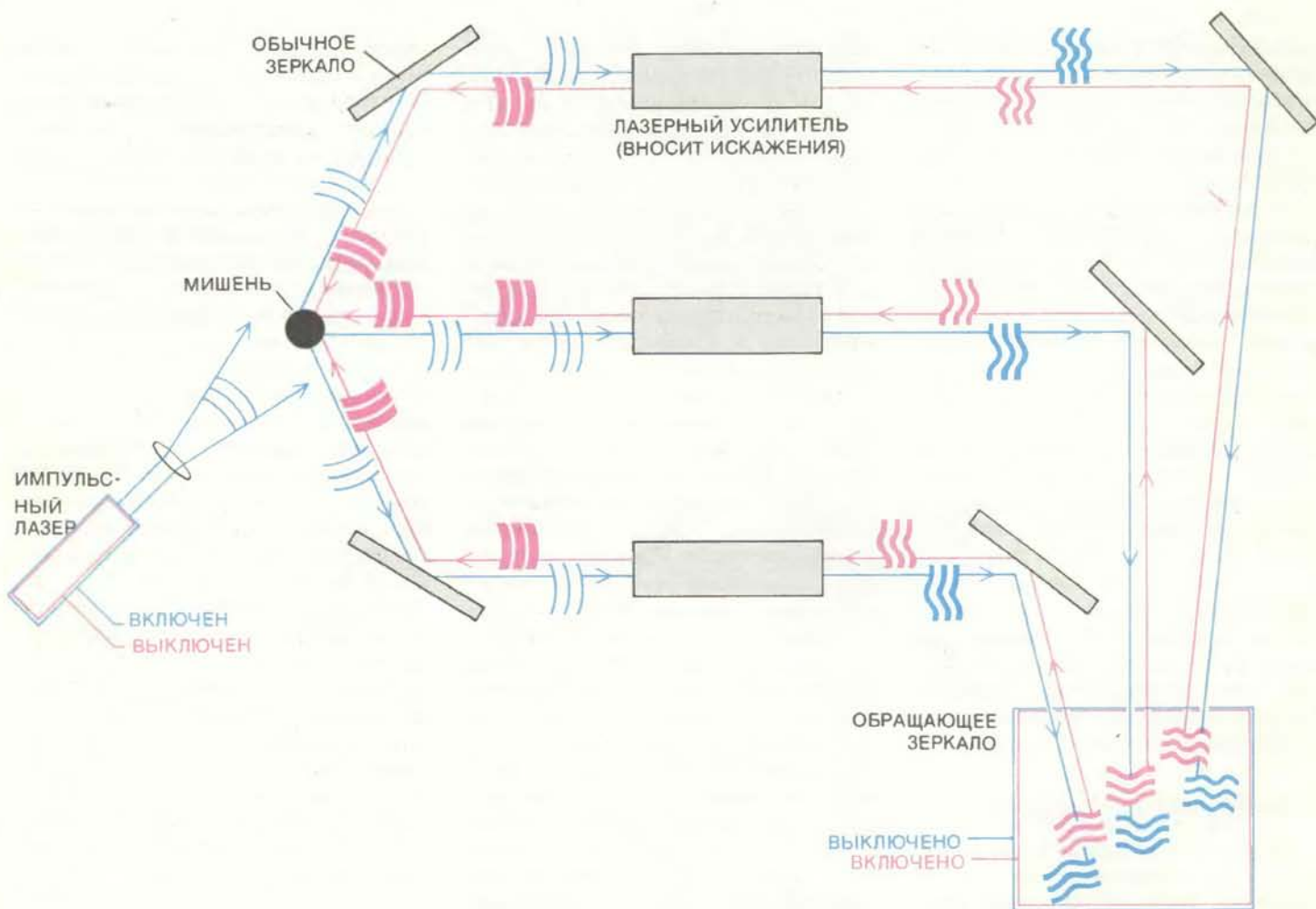
Одним из потенциальных приложений четырехволнового смещения для обработки изображений является со-

здание прибора, распознающего образы в реальном времени. Его идея была предложена группой ученых Калифорнийского технологического института, в которую входил и я, в 1978 г., а в 1980 г. Дж. Уайт (в то время работавший в том же институте) и Ярив и независимо от них в том же году С. Г. Одулов и М. С. Соскин из Института физики АН УССР продемонстрировали такой прибор в действии. В основе работы прибора лежит метод четырехволнового смещения. Три входных пучка (два опорных и пробный) проходят через соответствующие транспаранты, которые требуется сравнить. Картина, сформированная результирующим сопряженным пучком, выявляет совпадения (если они имеются) в изображениях транспарантов. Например, в эксперименте Уайта и Ярива на одном из них была последовательность букв *C-A-L-T-E-C-H*, а на другом — буква *C*. На

выходе системы появились два ярких пятна, «указывающих» те места в строке, где встречается эта буква.

Ассоциативная память

Принцип действия идеального прибора для распознавания образов основан на регистрации точного совпадения ключевой и искомой букв в строке. А как быть, если тестируемая буква несколько отличается от ключевой? Пусть, например, эти буквы напечатаны различным шрифтом, например рубленным (без засечек) и антиква (с засечками), или, скажем, одна из них или обе имеют неясные очертания или даже отсутствующие участки. Эти примеры представляют практический интерес, поскольку они часто встречаются в нашей повседневной жизни: неполное изображение мы узнаем благодаря так называемой ассоциативной памяти.



СИСТЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ может быть использована для инициирования термоядерного синтеза. Мишень для синтеза облучается импульсом маломощного лазера (голубой). Отраженные мишенью импульсы проходят три лазерных усилителя. Интенсивность каждого импульса растет, но при этом вносятся искажения. Затем импульсы направляются в четырехволновое обрачающее зеркало. К моменту достижения зеркала синхронизация

импульсов нарушается, поскольку они проходят различные расстояния. Когда все эти импульсы «погружены» внутрь зеркала, оно включается, сопрягая по фазе каждый импульс и обрача их временную последовательность (красный). На обратном пути искажения устраняются, импульсы синхронизируются, так что на мишень приходит интенсивный импульс излучения.

Т. Коонен из Хельсинкского университета и вслед за ним Дж. Хопфилд из Калифорнийского технологического института разработали модели ассоциативной памяти, модификации которых можно реализовать, используя систему с обращающимися волновой фронт зеркалами. Эта модель может пролить свет на то, как в мозге человека функционируют нейронные цепи. В основе идеи лежит математический алгоритм, который, по сути, сравнивает строку входных данных с хранящимися в памяти, формирует новый вариант строки данных и затем итерирует, т.е. повторяет, ту же операцию, используя новый вариант в качестве входных данных. Сравнение, отбор и возвращение к началу цикла повторяются до тех пор, пока входная и результирующая строки данных не сойдутся, т.е. не станут одинаковыми. Многие исследователи, в том числе Х. Колфилд из Алабамского университета, Д. Псалтис из Калифорнийского технологического института, А. Фишер из Исследовательской лаборатории ВМС США и А. А. Веденов из Института атомной энергии им. И. В. Курчатова в СССР, для моделирования этого процесса привлекают ЭВМ и электронно-оптические средства.

В настоящее время оптические устройства ассоциативной памяти разрабатывают Б. Соффер, Даннинг, Ю. Овечко и Э. Маром в Хьюзе и независимо от них Д. Андерсон в Астрофизической лаборатории при Объединенном институте в Колорадо. В схеме, разрабатываемой в Хьюзе, для хранения информации используется обычная статическая голограмма, а обращающиеся зеркала обеспечивают необходимую обратную связь изображений (см. рисунок на с. 39). Конструктивно этот прибор представляет собой попросту резонатор, замкнутый на каждом конце обращающимся зеркалом. Голографический элемент памяти помещается внутрь резонатора. Одно из обращающихся зеркал обладает пороговыми характеристиками, позволяющими для каждой следующей итерации выделять из хранящихся в памяти те признаки, которые больше всего совпадают с признаками входного изображения.

Хотя цифровые компьютеры и могут обрабатывать изображения и выполнять функции ассоциативной памяти, они это делают в виде последовательности дискретных шагов. Оптические схемы дают большое преимущество: обработку образной информации можно проводить параллельно. Иначе говоря, одновременно

можно обрабатывать сразу все поле картины.

Частотные эффекты

Рассматривая различные приложения четырехволнового смешения, мы неявно предполагали, что все три входных пучка и выходящий пучок имеют одну и ту же частоту, т.е. одинаковую длину волны. Такой вариант взаимодействия называется «вырожденным». В 1978 г. Р. Абрамс из Хьюзской научной лаборатории и я проанализировали случай «почти вырожденного» четырехволнового смешения, примером которого служит ситуация, когда частота падающего пробного пучка слегка сдвинута по отношению к частоте обоих пучков накачки.

Почти вырожденное четырехволновое смешение возникает в следующих ситуациях: частота пробного пучка, отраженного движущимся спутником, может иметь доплеровский сдвиг по отношению к частоте опорных пучков базирующегося на земле обращающегося зеркала; в системе могут использоваться два лазера (один для пучков накачки и другой для пробного пучка) с несколько разнящимися частотами генерации; на обращающееся зеркало падает световой импульс с широким частотным спектром.

В соответствии с идеей, высказанной Яривом, Фекете и мною в 1979 г., обращающееся зеркало можно использовать для компенсации эффектов так называемого уширения длительности импульсов в волоконно-оптических кабелях. Такие эффекты ограничивают скорость передачи информации по кабелю, поскольку плотно расположенные импульсы при заметном их уширении могут перекрываться так, что информационную строку не удается распознать. Уширение возникает из-за того, что различные частотные компоненты импульса распространяются в данном веществе с несколько разными скоростями. Если четырехволновое обращающееся зеркало расположить в середине пропускающего импульсы волоконно-оптического кабеля, порядок следования частотных компонентов импульса изменится так, что имеющие меньшую скорость компоненты покинут зеркало раньше, чем имеющие большую скорость. Поэтому на второй половине трассы быстрые компоненты догоняют медленные, восстанавливая качество импульса сужением его до исходного состояния.

Каким образом обращающееся зеркало переупорядочивает частотные компоненты импульса? В вырожден-

ном случае интерференционная картина, наводимая в среде четырехволнового смешения пробным пучком и одним из встречных пучков накачки, покоится на месте без перемещений. Второй пучок накачки отражается от воспроизводящих эту картину неоднородностей среды и дает обращенный пучок. В почти вырожденном случае из-за частотного сдвига интерференционная картина смещается, создавая в среде взаимодействия движущееся обращающее волновой фронт зеркало. В результате при отражении пучка накачки его частота приобретает доплеровский сдвиг (так же как меняется высота гудка поезда, проносящегося мимо неподвижного наблюдателя). По закону сохранения энергии сдвиг частоты обращенного пучка по отношению к пучкам накачки должен быть равен по величине, но противоположен по знаку сдвигу частоты пробного пучка; частотный спектр пробного пучка симметрично «перекидывается», или инвертируется.

Меняя частоты взаимодействующих в обращающем зеркале пучков, можно реализовать так называемый узкополосный отражающий оптический фильтр. Обычно такой фильтр блокирует (т.е. не обращает или не отражает) все частоты, кроме очень узкой полосы шириной порядка миллионной доли несущей оптической частоты. Для сравнения укажем, что простой кусочек цветного стекла, представляющий собой относительно грубый пропускающий светофильтр, пропускает свет в частотной полосе шириной, равной сотой доле оптической частоты. Реальные свойства фильтра зависят от геометрии обращающегося зеркала и свойств используемой нелинейной среды. Так, например, фильтр не будет отражать, если атомы не успевают отследить бегущую интерференционную картину. Впервые предложенный в 1978 г. Абрамсом и мною узкополосный обрабатывающий волновой фронт фильтр разрабатывается сейчас во многих лабораториях с применением разнообразных нелинейных сред и лазерных источников. Хотя в будущем эти фильтры смогут заменить существующие модели на спутниках и в других системах связи, в настоящее время о них можно говорить лишь как о перспективных устройствах.

Временная модуляция

Модуляция по времени одного или более взаимодействующих при четырехволновом смешении оптических пучков с целью кодирования сообщения входит в другой важный класс методов обработки информации. По-

добные системы можно было бы использовать для эффективной связи со спутником. Отраженная волна генерируется отражающим зеркалом, лишь когда нелинейная среда освещается одновременно пробным и обоими накачивающими пучками. Следовательно, включая или выключая один или несколько пучков, можно управлять коэффициентом отражения зеркала и вносить в отраженный пучок кодированное сообщение.

Допустим, на спутнике установлен маломощный лазер-бакен. Представим теперь, что этот пробный лазер направлен на находящуюся на земле станцию с лазерным усилителем и четырехволновым отражающим зеркалом. Если отражающее устройство является кодирующим, оно будет не только компенсировать турбулентность, но и переправлять назад на спутник закодированную информацию. Более того, при определенных условиях система может отслеживать движение космического объекта.

Обращающее зеркало может также обращать временной ход импульса так, чтобы его часть, входящая в прибор последней, выходила первой. Такой отражающий временной профиль прибор был независимо предложен Д. Миллером, в то время сотрудником Эдинбургского университета, О'Меарой и Яривом. Реализация этой идеи могла бы сыграть значительную роль в исследовании лазерного термоядерного синтеза.

Представьте отражающее зеркало такой толщины, что в нелинейной среде поместился бы весь профиль, занимаемый импульсом в пространстве. Для импульса длительностью в одну миллиардную долю секунды, например, толщина отражающего зеркала должна быть 0,3 м. В тот момент, когда весь импульс попадает в среду, отражающее зеркало мгновенно включается введением двух встречных волн накачки. Стоит включиться волнам накачки, как вошедшая последняя часть импульса устремится первой покинуть среду взаимодействия.

О'Меара совместил принципы действия прибора, отражающего временной ход импульса, и двухпроходной схемы компенсации. В его устройстве отраженный пучок проходит назад через среду для компенсации искажений. Он предложил также схему, которая способна одновременно синхронизировать импульсы блока лазерных усилителей, установленных в параллельной конфигурации. Система может освещать термоядерную мишень и компенсировать наводимые при этом оптические искажения, оптимизируя тем самым эксплуатационные характеристики.

Возможность независимо кодировать по времени разные пучки удобно использовать для реализации еще одного класса полностью оптических процессоров, осуществляющих операции свертки и корреляции зависящих от времени функций. Так, например, коррелятор (предложенный О'Меарой и Яривом) является, по сути, временным аналогом прибора распознавания в реальном времени пространственных образов и может, таким образом, распознавать импульсы заданной формы. Другие версии такого процессора могут быстро закодировать или декодировать сообщение с временным кодом. Эти временные схемы могут быть использованы в устройствах обработки сигналов, в радарх и некоторых оптических приборах.

Г. Агравал и Х. Флитзанис из французской фирмы QUANTEL высказали предположение о возможности использовать фазовое сопряжение для определения состояния логических схем — ключевых элементов потенциальных оптических компьютеров. Логический оптический элемент мог бы работать на пучках, встречно распространяющихся в нелинейной среде, по типу опорных волн в четырехволновом смешении. Пробный пучок, введенный в такой логический элемент надлежащим образом, мог бы быть обращен и считан, выдав информацию о логическом состоянии элемента. Тестирование пробным пучком не повлияло бы на работу и не изменило бы логическое состояние элемента памяти.

Фундаментальные исследования

Проблема обращения волнового фронта объединила многие прикладные и фундаментальные направления в оптике. Особенно заметный прогресс в этой связи был достигнут в спектроскопии, изучающей взаимодействие излучения с веществом. В этой области экспериментальная схема рассматриваемого явления применяется иначе: три входных пучка (пробный пучок и два пучка накачки) используются для изучения свойств самой нелинейной среды. Измеряя интенсивность отраженного пучка как функцию состояния поляризации, частоты, интенсивности и угла падения сигнального и опорных пучков, давления буферного газа (в случае газовой среды) и интенсивности приложенных электрического и магнитного полей, можно, например, изучать физику и спектроскопию процесса четырехволнового смешения.

Применение этих методов для изу-

чения таких нелинейных сред, как пары из атомов, фоторефрактивные кристаллы и различные органические вещества, позволяет получить детальную информацию о характере фундаментальных атомных и квантовомеханических процессов. Хотя лазерная спектроскопия существует много лет, применение геометрии четырехволнового обращения позволяет глубже понять характер физического взаимодействия света с веществом.

Кроме того, квантовомеханические свойства взаимодействия, создающего отраженный пучок, могут оказаться полезными для создания нового класса сверхчувствительных детекторов, чувствительность которых была бы достаточной для реагирования на действие гравитационных волн или для перехвата сообщений, передаваемых по волоконно-оптическим телефонным линиям. Хотя разработки такой аппаратуры пока находятся в начальной стадии, исследования в этой области ведутся на международном уровне.

Идеи, методы и основные приложения оптического обращения волнового фронта в принципе могут быть распространены и на все остальные области электромагнитного спектра. Фазовое сопряжение в микроволновом диапазоне, например, могло бы быть использовано в радиолокации, в системах обработки изображений в миллиметровом диапазоне и системах обработки высокочастотных временных сигналов, а также в микроволновой спектроскопии.

Как в СССР, так и в США ученые изучают также возможность использования явления обращения в звуковом диапазоне. Практическим результатом таких исследований могло бы быть создание приборов для обработки акустических сигналов и систем звуковой локации, которые в конечном счете усовершенствовали бы методы обнаружения подводных лодок и слежения за ними.

Ответы на вопросы

Теперь, когда рассмотрено множество потенциальных применений явления обращения волнового фронта, можно ответить на вопрос, поставленный ранее: что мы увидим, заглянув в отражающее волновой фронт зеркало? В обычном зеркале наблюдатель, естественно, видит собственное лицо. Свет, рассеянный различными частями лица, отражается зеркалом и частично попадает в его глаза. Обращающее зеркало весь рассеянный лицом свет будет направлять назад к точкам рассеяния. Свет, рассе-

янный, например, носом, будет отражен и попадет точно на нос. Единственное, что увидит наблюдатель, это свет, рассеянный сетчаткой, отразившийся от обрабатывающего зеркала и вернувшийся в глаз. Иначе говоря, наблюдатель увидел бы однородно освещенную поверхность зеркала без каких-либо деталей. Другой человек, который прямо смотрит на наблюдателя (т. е. не через зеркало), увидел бы, однако, что лицо наблюдателя освещается обрабатывающим зеркалом.

В заключение остановимся еще на одном занимательном вопросе. Если вспомнить о корпускулярно-волновой природе света (принцип дуализма), то естественно задаться вопросом о возможности обратить движение материи. Нелинейно оптические взаимодействия, приводящие к обращению волнового фронта, основаны на вынужденных эффектах и поэтому имеют ограничения с точки зрения известного физического закона, называемого принципом Паули и относящегося к частицам, именуемым бозонами. Все бозоны являются частицами с целочисленным значением спина. (Спин — это параметр квантовомеханической теории.) Фотон, или квант света, имеет, к примеру, спин, равный 1, и является поэтому бозоном. Электроны, протоны, нейтроны и некоторые нестабильные элементарные частицы, напротив, являются фермионами, или частицами с полуцелым спином, и, согласно принципу Паули, не могут участвовать в вынужденных взаимодействиях.

Многие виды бозонов, такие, как ядра гелия-4 (состоящие из двух протонов и двух нейтронов), куперовские пары (электрон-позитронные квазичастицы, существующие в сверхпроводниках) и некоторые короткоживущие элементарные частицы (пи- и К-мезоны, например), могут в принципе принимать участие в «обращающих во времени» взаимодействиях волн вещества. Сверхтекучие жидкости и сверхпроводники могут оказаться подходящими объектами для взаимодействий такого рода. Однако их экспериментальная реализация представляется маловероятной из-за слабости взаимодействия частиц между собой и с фотонами, требования интенсивного неискаженного пучка для наблюдения эффектов и малого времени жизни многих бозонов. Но до изобретения лазеров область нелинейной оптики (лежащая в основе явления обращения волнового фронта), хотя и известная в принципе, была лишь мысленным экспериментом и никто не был уверен в возможности ее использования как экспериментальной основы в физических исследованиях.

Универсальный фазовый переход

ВОЗМОЖНО ли, чтобы результат лабораторного эксперимента пролил свет на тайну происхождения галактик? Вполне возможно — утверждает В. Цурек, физик-теоретик из Лос-Аламосской национальной лаборатории.

В основе смелого предложения Цурека — универсальный характер поведения вещества вблизи точек фазового перехода, когда меняется состояние вещества. Наиболее известным примером может служить таяние льда. Примечательно, что физические законы, описывающие этот процесс, применимы и к другим фазовым переходам, а диапазон соответствующих температур начинается вблизи абсолютного нуля (0 К, или $-273\text{ }^\circ\text{C}$) и простирается до 10^{28} К. Крайние значения этого диапазона соответствуют приблизительно температуре сжижения гелия и температуре, при которой, как принято считать, возникла наша Вселенная.

В журнале «Nature» Цурек пишет о том, что фазовые переходы в жидком гелии могут служить моделями фазовых переходов, происходивших во Вселенной вскоре после ее рождения, и конкретно о переходе гелия из нормального жидкого состояния в сверхтекучее. Свойства сверхтекучей фазы действительно экзотичны. Например, жидкий гелий в сверхтекучем состоянии течет совершенно без трения. Кроме того, его теплопроводность (которая в миллион раз больше, чем теплопроводность нормальной фазы) выше теплопроводности любого металла. Известно также, что в сверхтекучей жидкости существуют квантованные линейные вихри (или так называемые долгоживущие водовороты).

Эти линейные вихри аналогичны космическим «струнам», существование которых предсказано, но пока еще не подтверждено наблюдениями. Предполагается, что фазовые переходы в ранней Вселенной привели к обильному рождению таких объектов. Длина космических струн может достигать миллиона триллионов (10^{18}) километров. Математически они описываются устойчивыми решениями определенных фундаментальных уравнений физики высоких энергий. (Космические струны не следует путать с суперструнами, из которых предположительно «сделаны» элементарные частицы — кварки и электроны.)

Около 10 лет назад советский ученый академик Я.Б. Зельдович из Института физических проблем им. Л.Д. Ландау АН СССР выдвинул предположение, что витки из космических струн длиной несколько сотен триллионов километров могли бы ускорить гравитационное сгущение галактик*. Гипотеза Зельдовича была затем развита рядом исследователей. В частности, Т. Киббл из Империял-Колледжа в Лондоне предложил сценарий образования струн в космологических фазовых переходах, что позволило ему оценить первоначальную плотность струн. К сожалению, этот результат нельзя проверить непосредственно.

Цурек предлагает выход из положения — аналоговый эксперимент. Определив плотность линейных вихрей, возникающих в процессе фазового перехода гелия в сверхтекучее состояние, можно было бы сделать определенное заключение о плотности космических струн, образовавшихся в ранней Вселенной. Предлагаемый эксперимент прост. Трубка в виде кольца, в которой находится жидкий гелий в нормальной фазе при температуре около 2 К, подвергается действию высокого давления. Быстрое снятие давления вызывает переход в сверхтекучее состояние. Если справедлив сценарий Киббла, то переход в сверхтекучее состояние должен сопровождаться образованием линейных вихрей — аналогов космических струн. В соответствии с тем же сценарием сверхтекучая жидкость в трубке должна начать циркулировать. И плотность линейных вихрей, и скорость потока в трубке нетрудно измерить — полученные результаты могли бы стать основой количественной проверки модели образования струн.

Помимо соображений, связанных с космологическими исследованиями, эксперимент Цурека интересен и сам по себе как метод исследования явления сверхтекучести. Хотя квантованные линейные вихри не новые объекты в науке, новой является возможность возбуждения вихревого движения при быстром фазовом переходе. В настоящее время несколько исследовательских групп планируют осуществить эксперимент Цурека.

* Применительно к физике элементарных частиц предположение о струнах впервые ввел Т. Киббл. Космологическое значение струн до сих пор не ясно. — *Прим. ред.*

Образование месторождений из горячих источников на дне океана

Морская вода, циркулирующая сквозь трещиноватые вулканические породы, расположенные над источниками тепла, участвует в обменных химических реакциях с этими породами.

В результате образуются значительные по размерам рудные месторождения, ряд из которых в настоящее время находится на суше

ПИТЕР РОНА

ПРИМЕРНО 15 лет назад, когда теория тектоники плит получила широкое признание, она принесла с собой и приятные открытия, и не очень приятные. С одной стороны, теория объяснила, как «живет» наша планета: континенты постоянно находятся в движении, а океанские котловины открываются и закрываются, по мере того как новая океаническая кора возникает при спрединге, а древняя океаническая кора разрушается в глубинах Земли. С другой стороны, небольшой возраст и однородный состав вновь образовавшейся океанической коры как будто бы исключали возможность формирования значительных рудных залежей в океанских котловинах. Современные открытия рудоносных горячих источников, связанных с рудными отложениями в океанских котловинах, опровергли этот вывод. Новые исследования помогут в конечном итоге открыть путь к добыче полезных ископаемых на морском дне в промышленном масштабе. Они также проливают свет на происхождение ряда крупных месторождений, встречающихся на суше.

В старых моделях статической Земли океанские котловины рассматривались как пассивные области стока материала, выветриваемого на континентах и сносимого — главным образом реками — в океаны. Эти модели объясняли формирование на морском дне только тех месторождений, которые были известны в то время. К ним относились скопления золота, олова, титана, алмазов и других тяжелых минералов, механически эродированных с обнажений пород на суше и концентрирующихся за счет течений

в «карманах» на морском дне, а также фосфоритов и марганца, химически осаждающихся в виде конкреций и корок из материала, растворенного в морской воде.

Когда начала развиваться динамическая модель Земли, основанная на теории тектоники плит, стало очевидно, что океанские котловины сами являются источниками тепла и металлов. Скопления металлов возникают за счет обменных процессов между морской водой и океанической корой, которая способна концентрировать месторождения рудных полезных ископаемых.

Такие месторождения не смогли бы сформироваться, если бы океаническая кора не была трещиноватой. Кора растрескивается вследствие того, что она сжимается при охлаждении, переходя из первоначально расплавленного состояния в твердое. Этот эффект усиливается при подвижках коры на спрединговых центрах и в результате флюидного давления. Следовательно, морская вода может проникать сквозь кору, мощность которой обычно составляет шесть километров, в подстилающую мантию. В тех районах, где в самой коре или под ней существуют источники тепла, в проницаемой коре возникает конвек-

тивная циркуляция морской воды (при конвекции тепло переносится флюидом — газом или водой). Конвективная система на океанском дне включает в себя просачивание вниз холодной и плотной воды сквозь проницаемую кору, которая ассоциируется с источником тепла. Затем вода нагревается и поднимается вверх. Такая система конвективной циркуляции горячих водных (гидротермальных) растворов способствует эффективному температурному и химическому обмену между водой и океанической корой.

ОСНОВНЫМИ источниками тепла являются камеры, содержащие магму, т.е. расплавленную породу. Тепло также выделяется при химических реакциях между морской водой и некоторыми составными частями мантийных пород. Дополнительным источником тепла служит геотермический градиент: увеличение температуры с глубиной, обусловленной главным образом диссипацией тепла при радиоактивном распаде элементов в коре и мантии.

Морская вода и трещиноватая кора существуют в океанских котловинах повсеместно, в то время как источники тепла, вызывающие в коре конвек-

РУДНЫЕ ТРУБЫ на Восточно-Тихоокеанском поднятии, возвышающиеся над дном на несколько метров и изливающие горячую воду. При этом осаждаются частицы сульфидов железа, меди и цинка, ассимилированные при химических реакциях с трещиноватыми породами океанической коры. Исследователи, обнаружившие такие рудные трубы в 1979 г., назвали их «черными дымами», поскольку своим видом они напоминали дымящиеся заводские трубы. Фотография сделана К.-Р. Кимом с обитаемого аппарата «Алвин», часть пробоотборника которого видна внизу справа.



тивную циркуляцию, локализованы. Они находятся главным образом там, где расплавленные породы отделяются от мантии и проникают в кору, формируя магматические камеры. Эти камеры распределяются вдоль границ, которые делят литосферу, или жесткую внешнюю оболочку Земли, на 10 больших и множество малых плит. Магматические камеры обнаруживаются также под вулканами, расположенными во внутренних областях плит; примером этому служат Гавайские острова, находящиеся вдалеке от границ Тихоокеанской плиты.

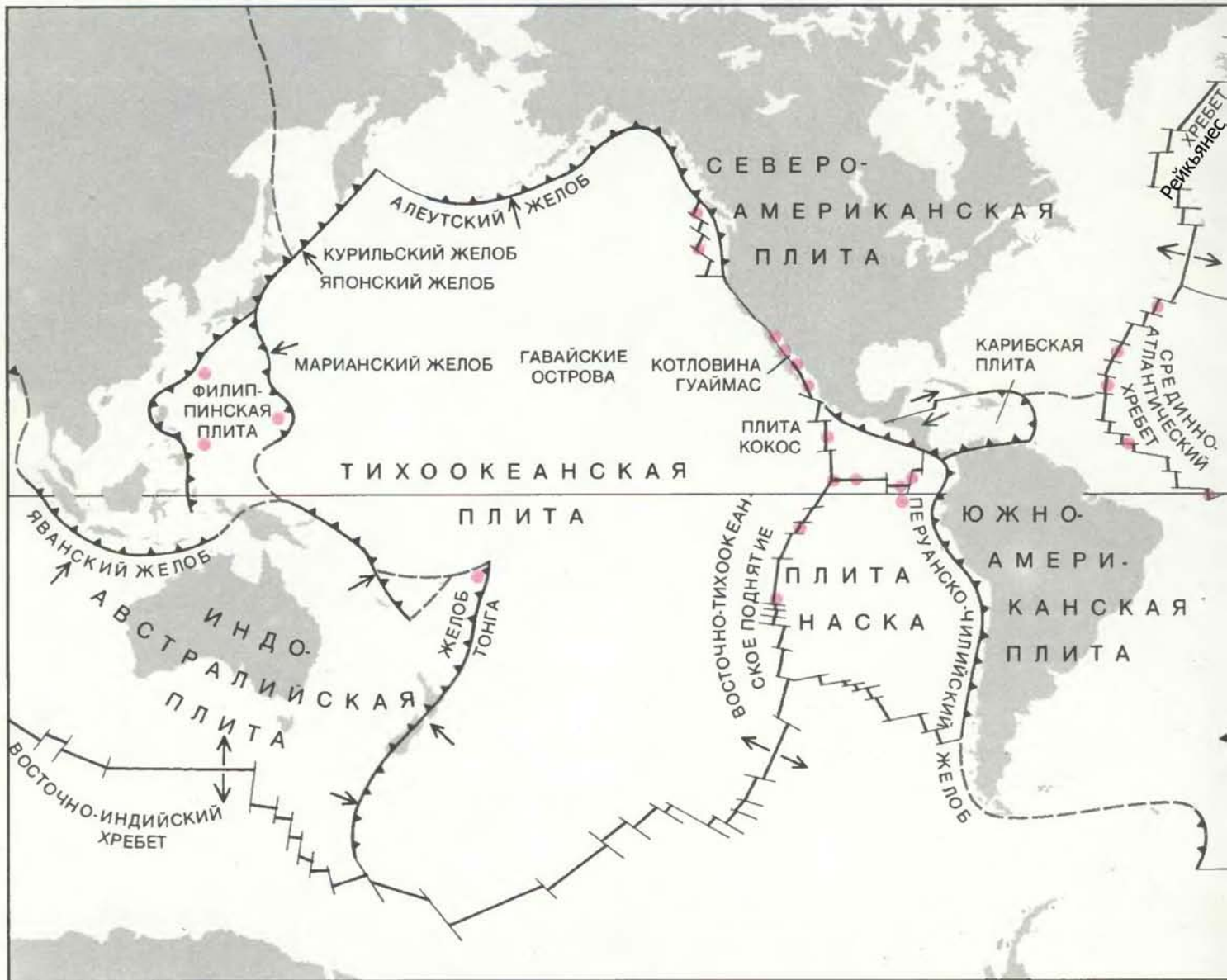
Масштабы температурного и химического обмена между океанической корой и циркулирующей водой огромны. Т. Уолери и Н. Слип из Северо-Западного университета оценили

интенсивность циркуляции. Они предположили, что разница между рассчитанным количеством тепла, поставляемого в океан спрединговыми центрами (т.е. зонами, где плиты расходятся), и измеренными средними значениями теплового потока через дно океана объясняется охлаждением за счет конвективной циркуляции морской воды. По их оценкам, вся масса океанской воды проходит сквозь кору на океанических хребтах каждые 10 млн. лет, а ее годовой перенос сопоставим с величиной стока Амазонки.

Обменные химические реакции, которые происходят, когда вода при высоких температурах циркулирует в океанической коре, идут по двум направлениям. Часть химических эле-

ментов и соединений, главным образом магний и сульфаты, удаляется из воды и переносится в кору. Другие элементы, в особенности некоторые щелочные металлы (литий и калий), щелочно-земельные элементы (кальций и барий) и переходные металлы (медь, железо, марганец и цинк), выносятся из коры и поступают в циркулирующую морскую воду, превращая ее в рудоносный раствор. Дж. Эдмонд и его коллеги из Массачусетского технологического института определили, что величина такого обмена для некоторых элементов сопоставима с речным переносом аналогичных элементов и соединений, которые выветриваются на континентах.

Одного наличия циркулирующей жидкости недостаточно: если возни-



РУДНЫЕ ЗАЛЕЖИ, сформированные океанскими горячими источниками, показаны на этой карте цветными кружочками. Для образования таких залежей необходимо наличие морской воды как рудообразующего флюида, трещи-

новатых вулканических пород или осадков как проницаемой среды и источника рудного вещества и магматических камер как источников тепла. Такие благоприятные условия имеют место на границах плит, из которых состоит ли-

кают рудообразующие гидротермальные конвективные системы, которые накапливают рудные отложения, то должны существовать и соответствующие им аномальные физические и химические условия. К физическим условиям относятся: 1) высокие температурные градиенты, способствующие интенсивному переносу жидкости в восходящей ветви конвективной циркуляции; 2) одновременное существование низкой проницаемости в зоне, где происходит обмен теплом (для поддержания температуры раствора в несколько сот градусов по Цельсию), и дискретных зон высокой проницаемости (необходимых для того, чтобы проводить раствор вверх и фокусировать разгрузку сквозь непроницаемую покрывку таким образом,

чтобы отложения концентрировались, а не диспергировались); 3) коровые подвижки, создающие благоприятное распределение проницаемых зон; 4) «инъекции» магмы, пополняющие магматические камеры и дающие энергию для гидротермальной циркуляции, и 5) непрерывная вулканическая активность или осадконакопительные, которые захороняют рудные залежи на океанском дне, предохраняя их таким образом от окисления и дезинтеграции.

Химическая среда, которая благоприятствует растворению металлов в коре, их переносу, осаждению и накоплению на морском дне в виде рудных отложений, может быть описана следующим образом. Холодная морская вода большой плотности, бедная металлами, имеющая щелочные свойства и обладающая высоким окислительным потенциалом, проникает вниз сквозь проницаемую кору, нагревается, проходя близ магматических камер, и поднимается в восходящей ветви. Когда нагретая морская вода движется вверх сквозь кору, химические реакции с окружающими породами идут по двум направлениям. Магний, переносимый морской водой, соединяется с гидроксидами и кремнием с образованием соответствующих минеральных фаз в коре. Эта реакция сопровождается выделением ионов водорода, повышающих кислотность раствора. В то же время содержащиеся в морской воде сульфатионы (SO_4) при реакции с железистыми минералами вулканических пород восстанавливаются до серы, которая образует сероводород (H_2S). При этом возникает кислый раствор, который активно растворяет металлы, имеющие очень низкую (до нескольких частей на миллиард) концентрацию в океанической коре.

Дополнительными источниками металлов являются флюиды, образующиеся из магмы, и летучие элементы, выделяющиеся из мантии (мышьяк, сурьма, ртуть и селен). Металлы переносятся гидротермальными растворами, главным образом как комплексные соединения с хлоридами поступающими из морской воды, в концентрациях, колеблющихся от одной до 100 частей на миллион. Э. Спунер из Торонтского университета и У. Файф из Университета Западного Онтарио подсчитали, что 350 км^3 магмы, остывая, нагревают 1000 км^3 воды (годовой сток реки Янцзы) до 300°C . При концентрации металла в растворе всего в одну часть на миллион из такого объема морской воды может выпасть в осадок 1 млн. т металла.

Ряд химических и физических механизмов способствует осаждению металлов из растворов и концентрации их в качестве рудных тел как вдоль зон восходящих потоков внутри коры, так и на океанском дне, где растворы разгружаются через насыщенные металлами горячие источники. Осаждение происходит за счет двух главных механизмов: смешивания и вскипания.

Смешивание гидротермального раствора с морской водой происходит, когда предельное давление перекрывающей толщи воды препятствует вскипанию, например в том случае, когда глубина превышает 2000 м, а температура воды равна 350°C . В результате происходит «затухание» раствора, понижение его температуры и изменение состава от кислого до щелочного. При этом металлические минералы быстро осаждаются. При восстановительных условиях (в отсутствие свободного кислорода) металлы соединяются с серой, находящейся в воде и появляющейся при растворении коры, и выпадают в осадок в виде полиметаллических сульфидов. При окислительных условиях металлы соединяются с кислородом, гидроксидами, сульфатами кремния или карбонатами и осаждаются в виде оксидов и гидроксилов металлов, металлических силикатов, сульфатов или карбонатов.

Вскипание происходит в том случае, когда предельное давление перекрывающей толщи морской воды уменьшается до критической точки, которая обычно соответствует глубине менее 2000 м для раствора с температурой 350°C . Жидкая фаза, содержащая хлорид натрия, отделяется от газообразной фазы, в которой остается сероводород. При вскипании осаждение полиметаллических сульфидов происходит или под дном океана, или при разгрузке сверхсоленых рассолов, плотность которых превышает плотность нормальной морской воды.

Аномальные физические и химические условия, необходимые для существования рудообразующих гидротермальных конвективных систем, возникают на океанских центрах спрединга, которые имеют как сходство, так и отличия. Все спрединговые центры разбиты по простиранию на отрезки длиной порядка 10 км. Эти отрезки разделены поперечными смещениями вдоль зон разломов, длина которых колеблется от нескольких до сотен километров. Все спрединговые центры имеют осевую зону шириной около одного километра с активным вулканизмом. Она обрамляется краевыми зонами, в пределах которых



тосфера (жесткая внешняя оболочка Земли), и в окрестности вулканов во внутренних областях плит, как, например, на Гавайских островах.

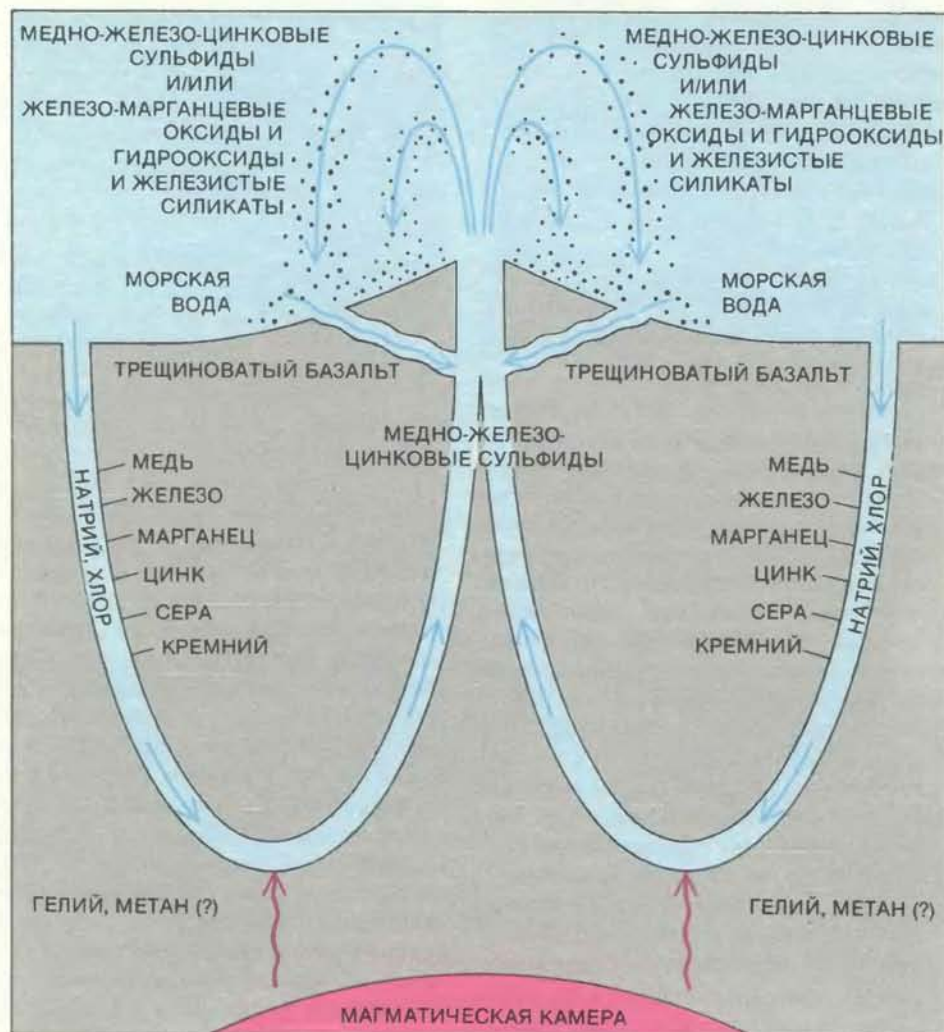


ДИАГРАММА ПРОЦЕССА РУДООБРАЗОВАНИЯ на спрединговом центре. Морская вода проникает вниз до глубины несколько километров через трещиноватую кору. Благодаря теплу, идущему из магматической камеры, объем воды увеличивается и она поднимается вверх. Нагретая вода извлекает из породы ряд элементов. В «открытых» системах все новые порции морской воды проникают вниз и смешиваются с поднимающимися горячими растворами, обогащенными рудными компонентами, вызывая осаждение металлов в коре в виде сульфидов; металлы, остающиеся в растворе, отлагаются на морское дно, поступая из горячих источников. В «закрытых» системах растворы разгружаются непосредственно в горячих источниках, которые осаждают сульфиды на дно.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ	БАЗАЛЬТ	МОРСКАЯ ВОДА	ХРЕБТЫ/РЕКИ
МЕДЬ (Cu)	-	+	
ЖЕЛЕЗО (Fe)	-	+	
МАРГАНЕЦ (Mn)	-	+	1
ЦИНК (Zn)	-	+	
КАЛИЙ (K)	-	+	2/3
ЛИТИЙ (Li)	-	+	10
РУБИДИЙ (Rb)	-	+	
БАРИЙ (Ba)	-	+	2/3
КАЛЬЦИЙ (Ca)	-	+	1
КРЕМНЕЗЕМ (SiO ₂)	-	+	2/3
МАГНИЙ (Mg)	+	-	1
СУЛЬФАТ (SO ₄)	+	-	1
НАТРИЙ (Na)	+	-	НЕПОСТОЯННО
ХЛОРИД (Cl)	?	?	НЕПОСТОЯННО

ХИМИЧЕСКИЙ ОБМЕН между циркулирующей морской водой и базальтовыми породами коры при температуре от 200 до 400°C. Знак минус означает, что базальт или морская вода являются источником данного элемента, плюс — что приемником. В правой колонке показано отношение количества металла, поставляемого в океан горячими источниками на океанских хребтах, к количеству, приносимому реками с континентов.

океаническая кора, образованная при спрединге в осевой зоне, разбивается разломами на блоки при ее подвижках.

Спрединговые центры различаются между собой по скорости разрастания океанского дна. Скорость спрединга по обе стороны от оси может быть малой (два сантиметра в год или менее), как, например, в Атлантическом океане, а также умеренной и высокой, как в Тихом океане. Когда скорость спрединга увеличивается, разница в высоте между осевой и краевой зонами уменьшается (от нескольких километров до сотен метров), магматические камеры увеличиваются в размерах (до 20 км вместо одного) и перемещаются на более высокий уровень (с глубиной залегания один километр вместо шести). Общие особенности строения спрединговых хребтов, равно как и различия между ними, влияют на природу рудообразующих гидротермальных систем.

УЧЕНЫМИ различных стран при исследованиях с океанологических судов была получена ясная картина рудообразования на дне в различных обстановках океанского спрединга. Процессы рудообразования имеют и много общих черт, и некоторые отличия, зависящие от конкретных обстановок. В Красном море рудообразование идет в одной из таких обстановок — на ранней стадии открытия океанского бассейна, связанного с низкоскоростным центром спрединга, рассекающего Красное море. Здесь горячие, насыщенные металлами рассолы заполняют ряд котловин вдоль осевой зоны спрединга. Рассолы образуются за счет рудообразующих, гидротермальных конвективных систем, которые существуют в котловинах. Низкотемпературные плотные морские воды, которые проникают вниз сквозь вулканические породы в краевых зонах, становятся необычайно солеными, поскольку они проходят через мощные толщи каменных солей (хлориды калия), захороненных в коре. Такие толщи характеризуют ранние стадии открытия океанского бассейна, когда в результате засушливых климатических условий испарение морской воды превышало величину ее пополнения, поскольку приток воды из соседних океанских бассейнов был ограничен окружающей сушей.

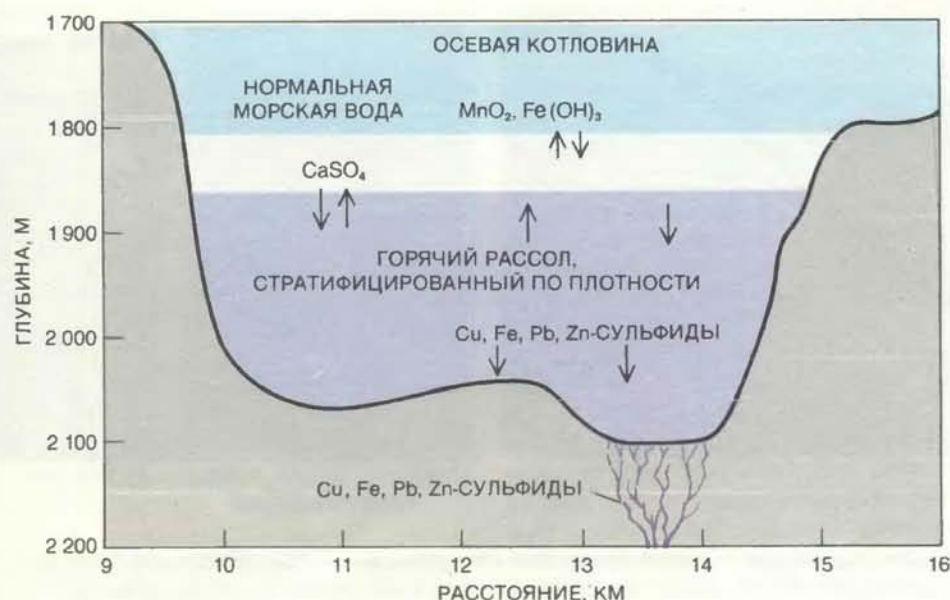
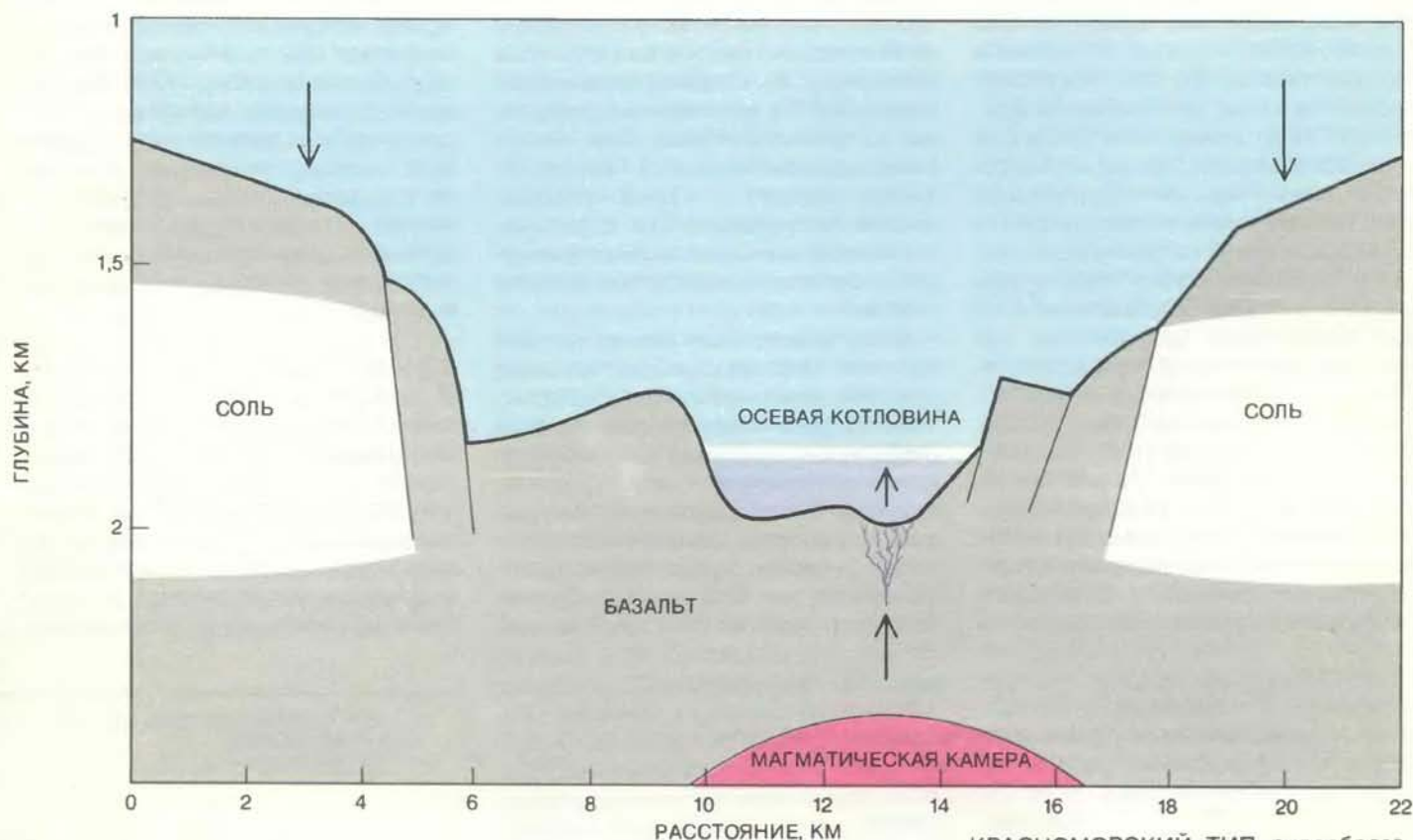
Когда соленость увеличивается, кристаллы соли выпадают в осадок и аккумулируются на дне в виде мощных горизонтов. Высокая соленость циркулирующих растворов увеличивает их способность к переносу растворенных металлов в виде комплексов

ных соединений с хлоридами, поставляемыми морской водой. Это также увеличивает их плотность, и поэтому нагретые растворы, разгружаясь на дно котловин, скапливаются как стратифицированные по плотности рассолы. Металлы выпадают в осадок из горячих рассолов отдельными минеральными фазами, которые отлагаются в котловинах и остаются там, формируя слоистые отложения металлоносных осадков мощностью до 100 м.

Способность металлов образовывать комплексные соединения и плотностная стратификация рассолов делают гидротермальную конвективную систему Красного моря исключительно эффективной для переноса и накопления металлов. Самым крупным из известных в пределах океанских центров спрединга отложений металлов является слоистое тело полиметаллических сульфидов во впадине Атлантис-II, имеющее в диаметре 7 км и расположенное в осевой зоне

Красного моря на глубине 2000 м непосредственно к западу от Мекки. Подсчитано, что его запасы составляют 100 млн. тонн (в пересчете на объемный сухой вес без соли) при содержании железа 29%, цинка — 2—5%, меди — 0,3—0,9%, серебра — 60 частей на миллион (6000 т при содержании 60 г на тонну), золота — 0,5 части на миллион (50 т при содержании 0,5 г на тонну).

Это месторождение стоит в одном ряду с крупнейшими сульфидными



КРАСНОМОРСКИЙ ТИП рудообразования характерен для начальной стадии открытия океанского бассейна, связанной с низкоскоростным центром спрединга. Кора котловины Красного моря содержит мощные толщи каменных солей, образовавшихся при начальном растяжении. Морская вода, проникающая вниз сквозь кору, становится необычайно соленой; соль повышает как способность раствора переносить металлы в виде комплексных соединений с хлоридами, так и плотность раствора. В результате образуются стратифицированные по плотности, обогащенные металлами горячие рассолы, которые формируют озера в осевых котловинах, как показано слева. При восстановительных условиях в нижних слоях горячих рассолов металлы осаждаются в виде сульфидов железа, свинца и цинка, при окислительных условиях там, где верхние слои рассолов смешиваются с морской водой, — в виде частиц сульфатов.

месторождениями на суше. Саудовско-суданская комиссия по Красному морю субсидировала проведение там в 1979 г. испытаний по добыче полезных ископаемых. Комиссия планирует приступить к крупномасштабной добыче ископаемых, как только улучшится конъюнктура металлов на мировом рынке.

КОГДА океанская котловина при низкоскоростном спрединге разрастается от начальной стадии (прирастает может служить Красное море) до развитой стадии (Атлантический океан), происходит ряд изменений. Океанская циркуляция из ограниченной становится свободной; условия смещаются от восстановительных к окислительным, так как содержание кислорода в воде увеличивается, а соленость гидротермальных растворов в целом уменьшается до солености нормальной морской воды, когда слои каменной соли за счет спрединга океанского дна перемещаются в стороны от осевой зоны. Любые сульфидные залежи, обнажающиеся на дне моря, будут разрушаться при окислении до тех пор, пока не изолируются от воды непроницаемой крышкой осадков или лавы. Рудные залежи, аналогичные отложениям впадины Атлантик-II, могут лежать под такими горизонтами на отдельных участках вдоль окраин Атлантического океана. Действительно, полоса рудных отложений может концентрироваться в океанической коре вдоль

линий тока спрединга дна за счет действующей гидротермальной системы, например такой, как во впадине Атлантик-II.

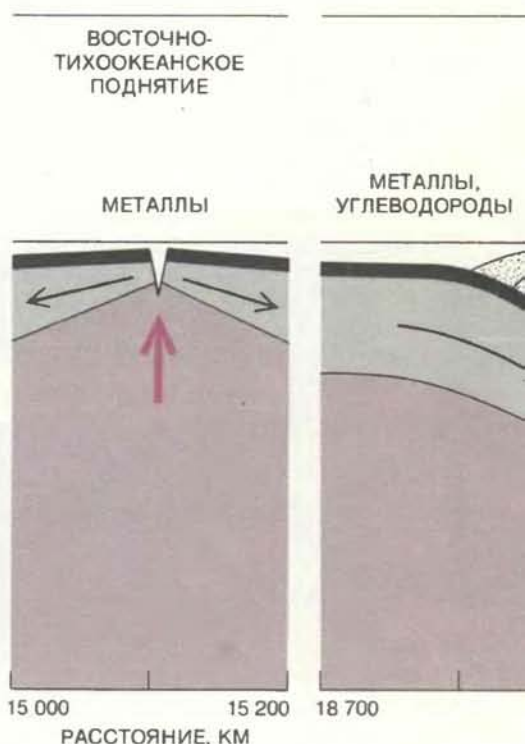
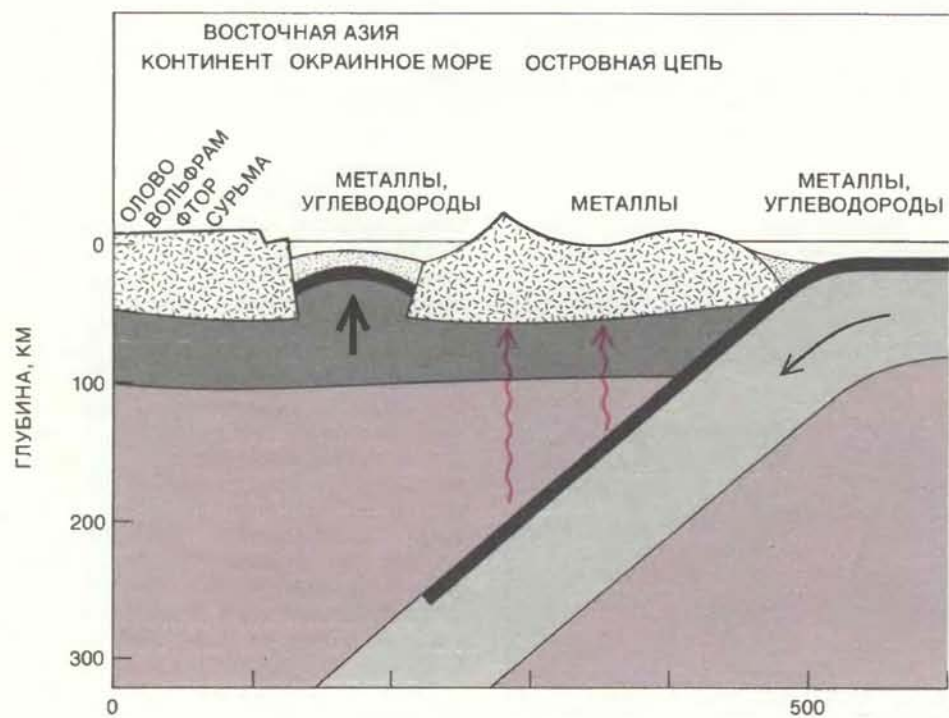
Существование отложений этого типа было доказано экспедицией на судне «Дискавери», организованной в 1972 г. Национальным управлением по исследованию океана и атмосферы. Во время выполнения разреза через Срединно-Атлантический хребт на широте Майами на восточной стенке осевой долины хребта были неожиданно драгированы черные слоистые крошащиеся образцы породы, представлявшие собой исключительно чистые окислы марганца (50% металла). Они накапливались достаточно быстро, что свидетельствует об их осаждении из низкотемпературных (менее 200°C) насыщенных металлами источников. Район был назван гидротермальным полем ТАГ (по названию проекта — «Транс-Атлантический геотраверс»). Его продолжают исследовать, используя, в частности, обитаемый подводный аппарат «Алвин».

Стратифицированные отложения окислов марганца, образовавшиеся при разгрузке низкотемпературных горячих источников в пределах поля ТАГ, лежат на кровле вулканических пород океанической коры. Стенки крупных зон разломов, которые смешивают сегменты Срединно-Атлантического хребта, предоставляют возможность, как через окна глубже заглянуть в кору. В 1976 г. Э. Бонатти,

который в то время работал в Майамском университете, и его коллеги драгировали со стенок зон разломов в Экваториальной Атлантике вулканические породы, которые содержали прожилки сульфидов меди и железа. Бонатти и его сотрудники провели аналогию между этими прожилками и тем типом сульфидов, который лежит в основе многих древних рудных тел на суше, называемых массивными сульфидными рудами.

Сочетание таких рудных отложений под дном океана и стратифицированных залежей окислов марганца на дне может быть образовано открытой системой гидротермальной конвекции. В такой системе морская вода проникает вниз и смешивается с поднимающимися вверх гидротермальными растворами, способствуя осаждению либо сульфидов железа и меди (при восстановительных условиях внутри коры), либо стратифицированных отложений марганца (при окислительных условиях — там, где остаточные растворы разгружаются на дно).

РУДООБРАЗОВАНИЕ в обстановке начальной стадии открытия океанского бассейна (при умеренных и высоких скоростях спрединга) наблюдается в отдельных точках в осевой зоне Калифорнийского залива, например в котловине Гуаймас. Эта котловина содержит слой осадков толщиной несколько сот метров, которые были принесены окружающими река-



ОБСТАНОВКИ, в которых формируются океанские горячие источники, показаны на схематическом разрезе через

Тихий океан. Это спрединговый центр (Восточно-Тихоокеанское поднятие), островная дуга над зоной субдукции и

ми. Осадки перемешиваются с хрупкими раковинами, состоящими из карбоната кальция и кремнезема и осаждающимися из поверхностных вод. Здесь имеется система гидротермальной конвекции: морская вода проходит вниз сквозь осадки и взаимодействует с подстилающими котловину горячими вулканическими породами; при этом формируются гидротермальные растворы, которые выносят металлы из пород и осадков. Когда растворы поднимаются вверх, они, реагируя с богатыми карбонатом осадками, становятся щелочными и осаждают сульфиды металлов (меди, железа, свинца и цинка), которые накапливаются под дном океана. На морском дне в осадок выпадают различные минеральные фазы остающихся в растворе металлов, которые формируют постройки в виде пагод, венчающих холмы высотой до 20 м. Такие холмы впервые наблюдал П. Лонсдейл из Скриппсовского океанографического института во время погружений на «Алвине» в 1977 г. Там, где горячие растворы проходят сквозь осадки, богатые органическим веществом, это вещество подвергается крекингу с образованием газа и нефти, которые насыщают осадки и поднимаются со дна струйками пузырьков или капелек.

Участок с рудообразованием, характерным для развитой стадии открытия океанского бассейна, находится к югу от Калифорнийского залива на 21° с.ш. на Восточно-Тихо-

океанском поднятии. В 1978 г. группе французских, американских и мексиканских исследователей, выполнявших на французском обитаемом аппарате «Сиана» геологический разрез хребта, посчастливилось наблюдать любопытные холмы высотой до 10 м, расположенные на краю осевой зоны на глубине 2600 м, и взять пробы осадков. Несколько месяцев спустя сотрудники лаборатории Французского института по изучению и эксплуатации морских ресурсов в Бресте определили, что отобранный материал состоял из сульфидов меди, железа и цинка, и это дало возможность считать обнаруженные холмы первыми «представителями» массивных сульфидных руд на дне океана. Массивные сульфидные руды являются в экономическом отношении наиболее важным типом рудных месторождений, разрабатываемых на суше.

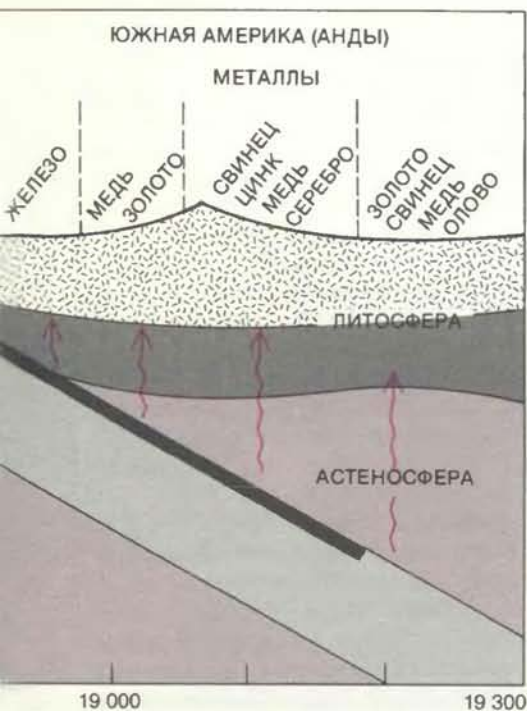
В 1979 г. группа американских, французских и мексиканских исследователей выполнила погружения в том же самом месте на аппарате «Алвин». Вблизи реликтовых холмов, сложенных массивными сульфидами, они увидели захватывающую картину: клубящиеся черные облака флюида, которые вырывались из отверстий, напоминающих отверстия каминных труб. Они назвали эти структуры «черными дымами» по аналогии с дымящимися заводскими трубами. Флюид, выходящий из отверстий, представлял собой высокотемпературный (350°C) кислый восстановительный гидротермальный раствор, обогащенный рудными компонентами. Смешивание его с окружающей морской водой приводило к тому, что сульфиды меди, железа и цинка осаждались в виде тонких черных частиц, взвешенных в поднимающихся вверх черных струях.

Каждый отдельный «черный дым» действует всего несколько лет. Время их существования определяется по радиометрическому датированию вещества, слагающего «потухшие» трубы, времени существования конвективных циркулирующих растворов, возрасту связанных с ними организмов и подсчитанной норме диссипации тепла, превышающей выделение тепла при спрединге океанского дна. Рудные трубы поднимаются на высоту до 10 м над холмами, имеющими примерно такую же высоту и состоящими главным образом из обломков, образованных при разрушении рудных труб. В горизонтальном сечении рудной трубы видно несколько рудных минералов, располагающихся концентрически, слоями толщиной несколько сантиметров. Медно-же-

лезные сульфиды, осаждающиеся из наиболее горячих растворов, заполняют внутренние части трубы; в наружных слоях находятся сульфиды железа и цинка, прорастающие сульфатами кальция, которые осаждаются из низкотемпературных растворов, смешивающихся с морской водой. Ассоциация металлов в рудных трубах сопоставима с наблюдаемой ассоциацией металлов во многих древних массивных сульфидах на суше. Типичные холмы на дне Тихого океана содержат 31% цинка, 14% железа, 1% меди, 165 г серебра на тонну руды и следы золота. Запасы металла в типичной рудной трубе оцениваются в несколько тысяч тонн, что, однако, далеко не достаточно для выделения ее в качестве объекта для промышленной добычи.

Гидротермальные конвективные системы, за счет которых образуются «черные дымы», являются в основе своей «закрытыми». Морская вода проникает в кору на глубину 1-2 км, достигая магматической камеры. Нагретая вода поднимается, превращаясь в гидротермальный раствор при химическом обмене с вулканическими породами, и разгружается на дне океана без значительного предварительного смешивания с морской водой. В условиях свободной океанской циркуляции на океаническом хребте, например, на Восточно-Тихоокеанском поднятии, эта конвекция в качестве рудообразующей системы является неэффективной, поскольку почти все металлы, разгружаемые в «черных дымах», образно говоря, уносятся с дымом и рассеиваются океанскими течениями. Только небольшая часть рудных отложений остается в виде холмов, надстраиваемых рудными трубами.

Две подводные вулканические горы с вершинами на глубине 2000 м, расположенные в стороне от спрединговой оси Восточно-Тихоокеанского поднятия, были исследованы в 1982 г. П. Лонсдейлом, Р. Батицей из Вашингтонского университета и Т. Симкином из Смитсоновского университета. В аппарате «Алвин» они опустились в кальдеры — кольцевые депрессии диаметром в несколько километров на вершинах подводных гор, образовавшиеся при обрушении в результате удаления магмы из ниже лежащей камеры. В кальдерах были обнаружены различные гидротермальные отложения. Исследователи, к своему удивлению, увидели «мерцающие» гидротермальные флюиды, которые изливались из рудных труб и фактически текли вниз по склону. Это означало, что выходящий из отверстия горячий флюид был тяжелее,



окраинное море между островной дугой и смежными массивами суши.

чем окружающая морская вода. Лонсдейл и его коллеги пришли к выводу, что гидротермальные растворы вскипели. Вследствие этого летучие отделились от плотной жидкости, которая образовывала своеобразное озеро в кальдере.

КАКОВО же практическое значение этих новых знаний о рудообразовании на дне океанов? Добыча полезных ископаемых со дна океана — дело будущего, но уже в настоящее время исследования обогащенных металлами горячих источников на океанских центрах спрединга проливают свет на процессы, которые сформировали многие древние гидротермальные рудные месторождения, оказавшиеся сейчас на суше. Уже в конце XIX в. некоторые исследователи, занимавшиеся проблемами геологии полезных ископаемых, пришли к выводу, что подводные вулканические эгзаляции вызывали местные выбросы флюидов, которые должны были играть важную роль в формировании ряда рудных месторождений. Современные исследования подтвердили это предположение. Кроме того, океанские горячие источники представляют собой природные лаборатории, в которых можно непосредственно наблюдать рудообразующие процессы.

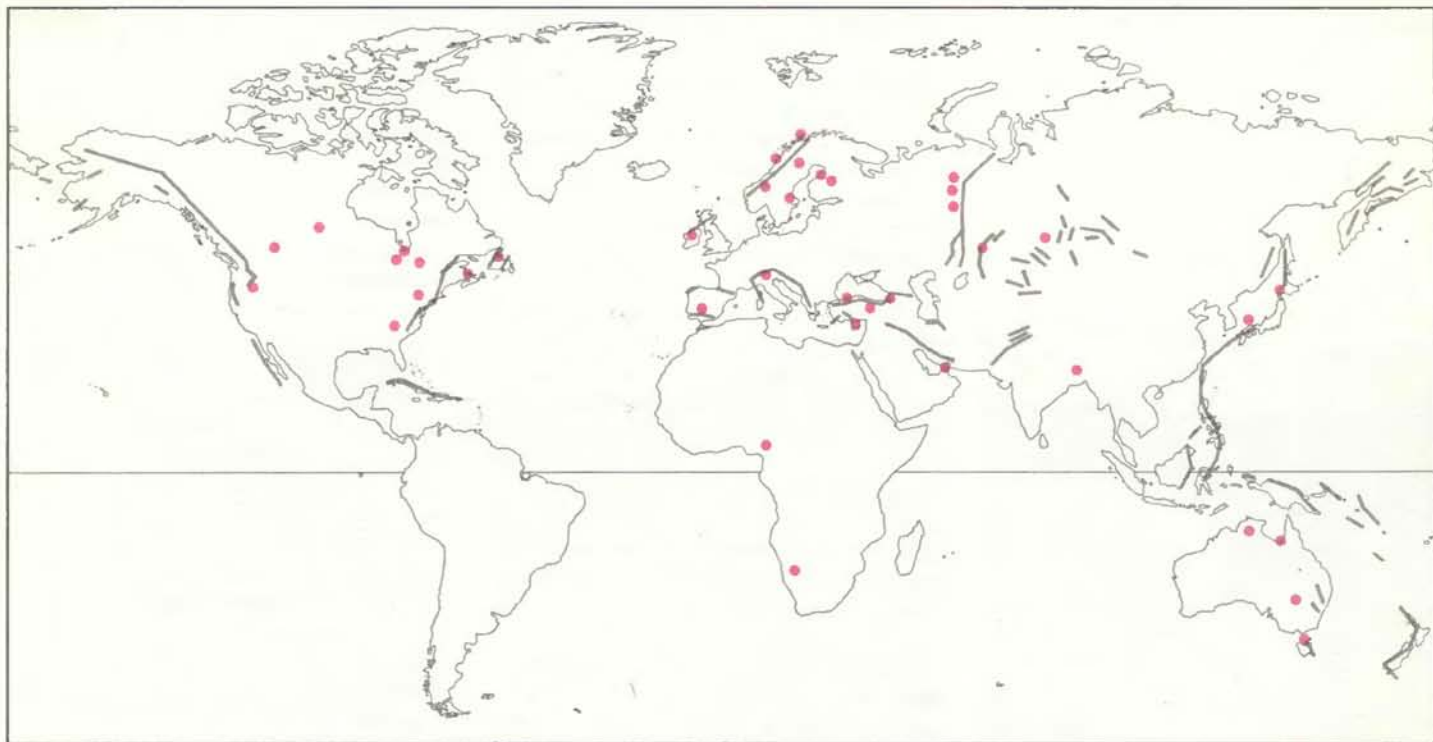
В ограниченном смысле область

применения этих знаний может быть распространена на офиолиты — разрезы океанической коры и верхней мантии, сформированные в океанских центрах спрединга и впоследствии поднятые на сушу. Гидротермальные залежи в офиолитах считаются прямыми аналогами отложений, сформированных в океанских обстановках, которые я описал выше. Классическим примером рудных месторождений является Тродосский массив, участок древней океанической коры площадью 2000 км², обнажающийся на о. Кипр. Само слово «медь» (copper) возникло из старого названия острова (Kupros), что подчеркивает значение месторождений Тродоса как источника этого металла с древнейших времен до настоящего времени. Здесь находится примерно 90 месторождений массивных сульфидов меди, железа и цинка, которые залегают в виде округлых тел диаметром в сотни метров и запасами до 15 млн. т. Они выполняют депрессии в вулканических лавах, которые изливались на дно океана примерно 85 млн. лет назад.

Тродосский массив является частью офиолитового пояса, содержащего аналогичные рудные тела и тянущегося через юго-восточную часть Турции, юг Ирана и Оман. Другие офиолитовые пояса различных возрастов, вмещающие гидротермаль-

ную минерализацию, протягиваются через Тибет вдоль северного края Гималаев; через острова западной части Тихого океана, включая Филиппины, Новую Гвинею и Новую Каледонию; вдоль восточной и западной окраин Северной Америки и вдоль северной окраины Южной Америки; в Апеннинах в Италии; в западной части Скандинавии и в Уральских горах в СССР.

В более широком смысле к океанским горячим источникам обращаются как к природным лабораториям, для того чтобы исследовать гидротермальные процессы рудообразования всюду, где бы ни встречались компоненты систем гидротермальной конвекции. Используя герметические контейнеры, ученые провели эксперименты по взаимодействию пород с морской водой при высоких температурах и давлениях. В этих экспериментах было обнаружено, что при взаимодействии воды с различными типами вулканических пород или с определенными типами осадков возникают кислые, восстановительные, насыщенные металлами растворы, аналогичные растворам из океанских горячих источников. Это означает, что процессы гидротермального рудообразования в океане приложимы к разным обстановкам — от описанных мною спрединговых центров до вулканических дуг и рифтовых зон на континентах.



ДРЕВНИЕ РУДНЫЕ ЗАЛЕЖИ, первоначально сформированные океанскими горячими источниками и в настоящее время находящиеся на суше, составляют ряд крупных рудных месторождений (цветные кружки). Сюда входят рудные тела в вулканических породах или осадках, которые

были первоначально образованы в океанской обстановке. Серыми ломаными линиями показаны офиолитовые пояса; слагающие их породы были сформированы на участках прежних спрединговых осей в океане и впоследствии подняты на сушу.

Океанское дно вокруг островных дуг, перекрывающих зоны субдукции на конвергентных границах вдоль западной части Тихого океана, включает в себя наименее исследованные, но многообещающие обстановки. К ним относятся окраинные моря, расположенные между вулканическими островными дугами и смежными массивами суши, например вблизи Японии, Филиппин, Индонезии и Меланезии. Центры спрединга океанского дна существуют во многих из этих окраинных морей. Большинство месторождений массивных сульфидных руд в офиолитах кипрского типа было сформировано именно в таких центрах спрединга.

Другую вулканическую обстановку, способствующую возникновению системы рудообразующей гидротермальной конвекции, представляют сама островная дуга и область между дугой и глубоководным желобом, где океаническая кора поступает в зону субдукции. К отложениям этого типа относятся массивные сульфидные руды меди, железа, свинца и цинка типа «куроко» (черные руды), обнаруженные в северной части острова Хонсю (Япония). Они содержат остатки сульфидных рудных труб, подобных тем, которые наблюдаются на Восточно-Тихоокеанском поднятии и которые, как полагают, были сформированы «черными дымами», выходящими на дно океана примерно 13 млн. лет назад. Сходные отложения различных возрастов имеются на острове Фиджи, на руднике Бучанс в Ньюфаундленде, в Авока на востоке Ирландии, в Кептенс-Флет и Вудлоун на востоке Австралии.

В отличие от руд типа «куроко», которые вмещают вулканические породы островных дуг, массивные сульфидные руды меди, железа, свинца и цинка типа «бесси» в южной части острова Хонсю встречаются в осадочных породах, переслаивающихся с вулканическими породами. С. Скотт из Торонтского университета пришел к заключению, что обстановка, в которой эти руды были сформированы 200 млн. лет назад, была аналогична обстановке, в которой образуются руды в осадках и на них в котловине Гуаймас.

В ИСТОРИИ Земли при региональном и глобальном рифтинге масс суши возникали обстановки, благоприятствующие возникновению систем океанской гидротермальной конвекции. Последний глобальный эпизод рифтинга имел место приблизительно 200 млн. лет назад, когда начал раскалываться суперконтинент Пангея. Рифты, которые раскры-

лись (и зарождающиеся рифты, которым не удалось раскрыться) в Атлантическом океане и в Средиземном море, прошли через стадии, аналогичные тем, которые имеют место в настоящее время в Красном море и в Калифорнийском заливе. Гидротермальные руды, образовавшиеся в то время, могли оказаться сейчас захороненными под многокилометровой толщей осадков. Когда после расхождения плит произошло их сближение и столкновение, то некоторые из этих рудных залежей были подняты на сушу и обнажены, как это имело место на Кипре.

Аналогичные эпизоды и участки могут быть идентифицированы, как связанные с более ранним протерозойским периодом. Ф. Соукинс из Миннесотского университета интерпретировал ряд осадочных руд, сформировавшихся 750-1500 млн. лет назад как продукты деятельности обогащенных металлами горячих источников, разгружавшихся в обстановках, аналогичных той, которая существует в котловине Гуаймас. Эти рудные отложения включают в себя стратифицированное тело Сулливан, состоящее из свинцово-цинковых сульфидных руд и расположенное в юго-восточной части Британской Колумбии, стратифицированные серебряно-свинцово-цинковые рудные залежи Айзе-Маунта в Австралии и свинцово-цинковые руды в русле реки Мак-Артур также в Австралии. К. Бострем из Копенгагенского университета интерпретировал протерозойские железные и марганцевые окисные руды северной части Швеции, увязав их с рифтовыми обстановками.

Если углубиться в геологическое время, можно увидеть, что условия, благоприятные для возникновения систем океанской гидротермальной конвекции, формирующей рудные отложения, превалировали 2,6-2,7 млрд. лет назад в породах архейского периода, которые обнажаются на Канадском щите на востоке Канады. Более 80 месторождений медно-цинковых массивных сульфидных руд, включая крупнейшее из известных месторождений (рудные тела Кид-Крик в Тиммонсе, Онтарио, с запасами 200 млн. тонн), и месторождения рудного района Норанда в Квебеке были образованы как раз в течение этого периода.

Тот факт, что геологи установили связь между рудными телами, образовавшимися в геологическом прошлом, и процессами рудообразования, имеющими место в океане в настоящее время, показывает, насколько изменилось мышление геологов со

времени появления 15 лет назад теории тектоники плит. Первоначально ученые считали, что рудообразование на динамическом дне океана невозможно. Выполненные с тех пор исследования рудообразования на океанских центрах спрединга показали, что дело обстоит иначе. «Неблагоприятные» особенности океанической коры — ее небольшой возраст, простота состава и несложная история деформации — компенсируются интенсивностью гидротермальных рудообразующих процессов, где бы ни располагались соответствующие магматические источники тепла — на погруженных границах плит или на участках развития внутриплитового подводного вулканизма.

В НАСТОЯЩЕЕ время ученые начинают понимать, что связывает обогащенные металлами горячие источники в различных океанских обстановках с древними рудными месторождениями, накопившимися за счет этих источников. В целом такой процесс характеризуется обменом теплом и веществом между вулканическими породами и морской водой, циркулирующей в системах гидротермальной конвекции. Он связан с рифтингом коры и вулканической активностью в различных обстановках океанских спрединговых центров, вулканических островных дуг и континентов.

Вариации основного процесса рудообразования вызывают формирование различных типов отложений, но могут приводить и к образованию одинаковых отложений. Например, сходные линзовидные стратифицированные колчеданные залежи образуются при возникновении избытка солености — либо при растворении местных солевых горизонтов, как во впадине Атлантик-II, либо при вскипании, как в кальдерах подводных гор. В противоположность этому отложения в виде холмов могут накапливаться в результате деятельности «черных дымов», извергающихся на морское дно. Вариации содержания металла в рудах связаны с содержанием металла в материнских породах; например, из континентальных пород гидротермальная циркуляция извлекает больше свинца, чем из океанских. Связь между исследованием рудных отложений в океанских горячих источниках и изучением их древних аналогов повышает результативность поиска крупных гидротермальных месторождений на суше и приближает нас к пониманию эффекта химического и температурного обмена между морской водой и корой, который происходит на океанском дне.

Химические средства защиты у высших растений

Некоторые химические вещества, образующиеся в растениях, ядовиты для травоядных животных или отпугивают их, другие снижают питательную ценность растений или нарушают нормальное развитие вредителей. В свою очередь травоядные животные находят пути, как использовать эти природные продукты

ДЖЕРАЛД А. РОЗЕНТАЛЬ

ДАЖЕ при поверхностном взгляде на взаимоотношения между высшими растениями и множеством всех тех животных, которые ими питаются, нельзя не поразиться удивительной способности растений к выживанию. Когда на растение нападает вредитель, например насекомое, оно не может ни убежать, ни защититься физически, как делают животные. Однако у многих растений в ходе эволюции выработались хитрые приспособления, которые не менее эффективны: это — химические средства защиты. Такие средства могут быть и простыми и сложными. В одних растениях образуются вещества, ядовитые для нападающих на них животных, в других синтезируются сложные соединения, которые нарушают цикл развития вредителя или влияют на его способность усваивать растительную пищу.

В свою очередь у насекомых и других травоядных животных выработались ответные реакции на химическую «войну» растений. Многим травоядным животным удалось приспособиться к защитным механизмам растений: они выдвигают свою собственную химическую «оборону». Так, у ряда насекомых развилась способность превращать потенциально вредные соединения, продуцируемые растениями, в питательные вещества или средства защиты от насекомоядных животных. Исследование подобных химических взаимодействий между организмами составляет основу новой быстро развивающейся области биологии — химической экологии.

Химическая экология изучает роль природных химических веществ во взаимоотношениях между организмами. Один из типов этих взаимоотношений — пищевые связи. У всех на-

секомых, питающихся растениями, в основном одинаковые потребности в пище, и большинство высших растений может их более или менее полно удовлетворить. Что же в таком случае определяет специфичность питания насекомых? Почему то или иное насекомое одни растения использует в пищу, а другие нет?

Еще Готфрид С. Френкель предположил, что для травоядных животных пригодность растения в пищу определяется не первичными его метаболитами, а вторичными. (Среди веществ, синтезируемых растением, первичными метаболитами называют вещества, абсолютно необходимые для его роста и размножения; вторичные метаболиты — это продукты обмена, которые не участвуют в основных процессах жизнедеятельности и, будучи различными у разных растений, определяют уникальность данного вида, разновидности или расы растений.)

В 1971 г. Р. Унттейкер и П. Фини из Корнеллского университета конкретизировали концепцию Френкеля. Они сформулировали понятие об аллелохимических веществах, или аллелохимикатах. Так они назвали вторичные метаболиты, которые образуются у особей данного вида и влияют на развитие, жизнедеятельность и поведение отдельных особей или популяции другого вида. (Специалисты по химической экологии сейчас используют два термина: *allelochemic* и *allelochemical*; я предпочитаю употреблять второй из них.) К аллелохимикатам относятся различные по своей природе и характеру действия соединения, в том числе аттрактанты, репелленты, аллергенные вещества и токсины. В этой статье я расскажу о тех из них, которые используются растениями для защиты от нападения

насекомых, а также других травоядных животных.

ОБЫЧНО для того чтобы установить, имеют ли конкретные аллелохимические вещества высшего растения защитные свойства, проверяют их токсичность на одном или нескольких видах насекомых, выбранных в качестве стандартов для оценки биологической токсичности. Для этого природные аллелохимические вещества включают в искусственную диету, на которой без них эти насекомые могут нормально существовать. Фини и его ученик Дж. Эриксон в работе, проведенной на бабочках-поликсенах *Papilio polyxenes*, несколько модифицировали этот метод для того, чтобы приблизить его к естественным условиям. Они не создавали для насекомых искусственной диеты, а просто вводили аллелохимическое вещество, образуемое изучаемым растением, в другое растение, которое в природе служит пищей для данного вида бабочек.

Взрослые *P. polyxenes* избегают растений семейства крестоцветных (Cruciferae), например горчицу, поскольку в них образуется аллелохимическое вещество синигрин, в состав которого входит токсичный компонент аллиллизотиоцианат. В то же время эти бабочки охотно поедают растения, относящиеся к семейству зонтичных (Umbelliferae), к которому, в частности, принадлежит сельдерей. Эриксон и Фини разводили личинок *P. polyxenes* на листьях сельдерея, в которые вводили синигрин. При таком питании развитие личинок заметно подавлялось. Когда количество синигрина в листьях сельдерея достигало того же уровня, что и у крестоцветных, все личинки в опыте погибали. Эти эксперименты показали, что ток-

сичные аллелохимические вещества могут превратить обычную растительную пищу насекомого-вредителя в неприемлемую для него.

Д. Джонс и его коллеги из Халлского университета разработали другой экспериментальный подход для проверки эффективности действия токсичных аллелохимических соединений. Они исследовали такие растения, как лядвенец рогатый и белый клевер. В растениях обоих видов образуются цианогенные гликозиды — соединения, построенные из остатков сахаров, к которым присоединены цианидные комплексы. Эти вещества запасаются в листьях. Если в растении есть два специфических фермента, то при повреждении листьев происходит

расщепление цианогенных гликозидов с образованием цианидного комплекса, из которого затем выделяется свободный цианид (HCN). По способности к образованию цианида у лядвенца и клевера наблюдается «полиморфизм»: лишь в некоторых растениях синтезируются и цианогенные гликозиды, и ферменты, необходимые для образования из них свободного цианида. Поэтому не все особи вида могут защитить себя от врагов с помощью цианогенных гликозидов.

Джонс воспользовался этой удивительной особенностью для того, чтобы определить, насколько эффективно образование цианида для защиты популяции растений в пределах данной территории. Он проанализировал

карту, опубликованную в 1954 г. Г. Дэдеем, который работал в то время на Уэльской станции по селекции растений в Эйберистуит. На ней было показано географическое распространение растений, синтезирующих одновременно и цианогенные гликозиды и соответствующие ферменты, а следовательно, способных образовывать свободный цианид. Дэдее обнаружил, что в тех районах, которые он обследовал, существует четкая связь между среднеянварской температурой и долей растений, способных к образованию цианида. В более теплых областях, например в зоне Средиземноморья, от 70 до 90% собранных растений могли образовывать цианид. А в сравнительно холодных



АНОМАЛЬНАЯ куколка с тремя «головами» развивается из личинки травяной совки, если она питалась экстрактом дубровки *Ajuga remota*. Это растение продуцирует фитоэксдизоны — соединения, «подражающие» гормонам роста личинки, называемым экдистероидами. Те процессы в организме личинки, которые обычно предшествуют метаморфозу, под действием фитоэксдизонов повторяются несколько раз, причем экзоскелет не сбрасывается, но каждый раз образуется новая головная капсула. Из-за лишних

головных капсул не может функционировать ротовой аппарат, и личинка гибнет от голода. Имитация собственных вредителю гормонов — одна из наиболее сложных форм химической защиты, которые встречаются у растений. Есть и другие способы защиты, например с помощью веществ, которые ядовиты для травоядных вредителей или отпугивают их, мешая им использовать растения в пищу или откладывать на них яйца.

районах, например в некоторых областях СССР, практически все проанализированные растения не обладали этой способностью.

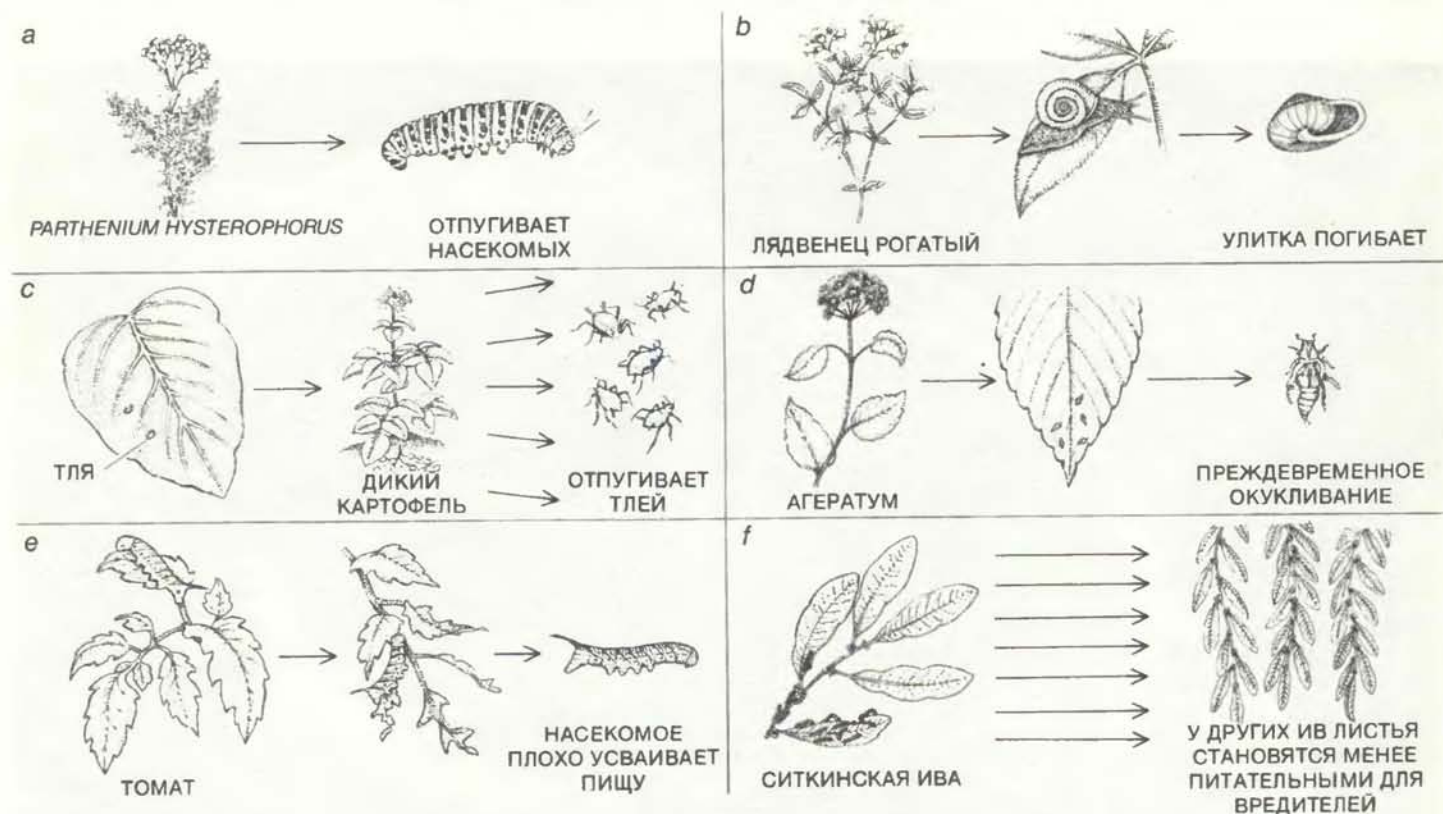
Джонс и его коллеги заметили, что слизи и улитки — основные «потребители» лядвенца рогатого — предпочитают использовать в пищу растения, в которых не образуется цианид. Следовательно, способность к образованию свободного цианида полезнее для растений, распространенных в более теплых районах, где слизи и улитки активны и в зимнее время. А там, где зимой численность популяций этих вредителей ограничена из-за сравнительно низкой температуры,

такая способность для растений имеет меньшее значение.

Другой тип защиты с участием токсичных аллелохимических веществ описан Э. Родригесом из Калифорнийского университета в Ирвине. В его заслуживающем внимания исследовании растительности Нижней Калифорнии и области Чиуауа (северная Мексика) показано, что у многих растений пустынь трихомы (волоски) являются своеобразными хранилищами природных токсичных веществ. Например, трихомы такого пустынного растения, как *Phacelia*, содержат множество ядовитых, аллергенных и инсектицидных соединений. У другого

обитателя пустынных районов — представителя семейства сложноцветных гваюлы *Parthenium hysterophorus* — в трихомах обнаружено несколько аллергенных соединений, удерживающих травоядных животных от использования гваюлы в пищу.

НЕКОТОРЫЕ аллелохимические вещества защищают растение не тем, что они ядовиты для травоядных животных или отпугивают их, а тем, что нарушают нормальный цикл роста и развития вредителя. Многие насекомые в своем развитии проходят три морфологически различающиеся



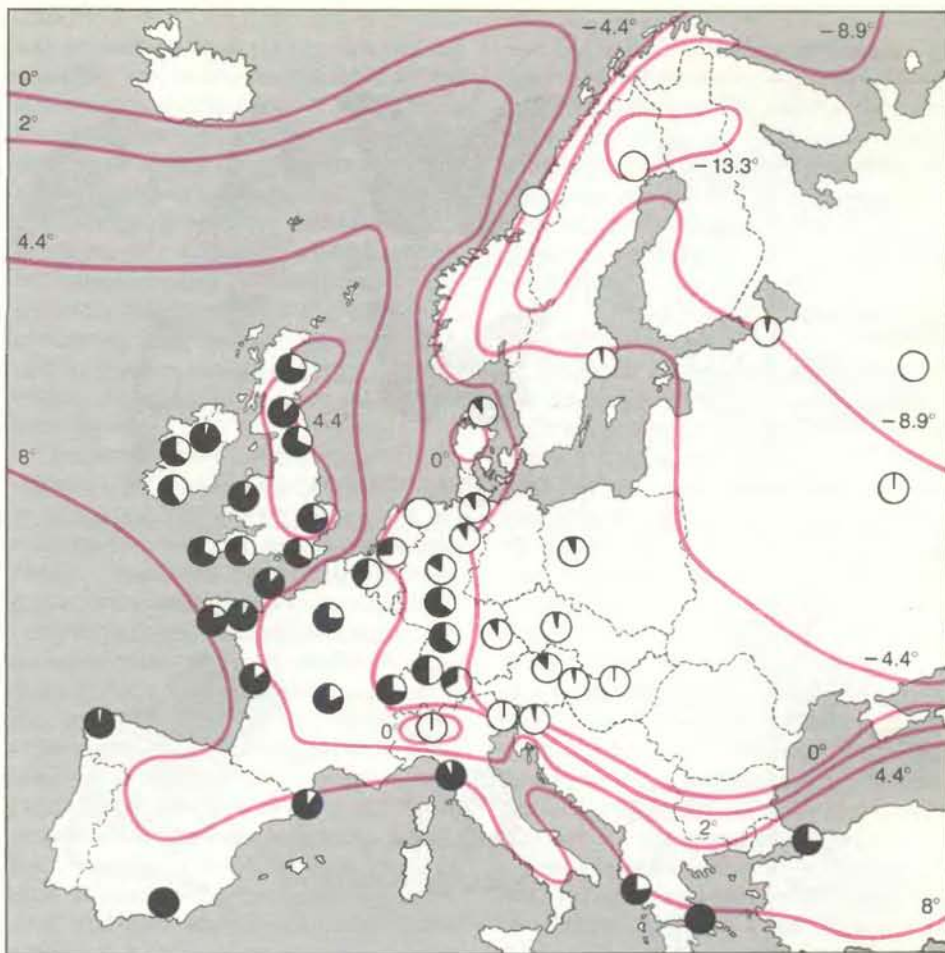
ХИМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ у высших растений весьма разнообразны; механизм их действия может быть простым, а может быть и очень сложным. В одних растениях, таких, как представитель сложноцветных гваюлы *Parthenium hysterophorus* (a), образуются вещества-репелленты, которые отпугивают вредителей. В других растениях, например у лядвенца рогатого (b), образуются токсичные соединения: некоторые экземпляры лядвенца способны к синтезу цианогенных гликозидов (которые состоят из остатков сахаров, связанных с цианидными комплексами) и, кроме того, имеют ферменты, разрушающие эти гликозиды, в результате чего выделяется свободный цианид. Более сложный механизм защиты — синтез растением веществ, «подражающих» соединениям, которые образуются в организме вредителя и участвуют в его жизнедеятельности. Например, у *Ajuga remota* синтезируются вещества, похожие на гормоны роста нападающих на это растение насекомых (см. иллюстрацию на с. 57). Аналогичный механизм защиты действует и у дикого картофеля *Solanum berthaultii* (c). В нем синтезируется один из компонентов феромона тревоги тли (когда на тлю нападают враги, она выделяет этот феромон для того, чтобы предупредить сородичей об опасности), и тли, как правило, избегают растения, выделяющие феромоны, так же, как и сво-

их врагов. Есть растения, которые защищаются от вредителей с помощью веществ, блокирующих биохимические процессы, жизненно важные для насекомого. Например, у декоративного растения агератум (*Ageratum houstonianum*) образуется вещество, блокирующее действие ювенильного гормона насекомых; в результате у личинок преждевременно происходит линька, и они гибнут (d). Многие растения не имеют постоянных запасов защитных химических веществ, а образуют их лишь в ответ на нападение вредителей. Например, когда на томаты нападают насекомые с грызущим ротовым аппаратом, то в поврежденном участке растения начинается синтез ингибиторов протеиназ, которые распространяются по всем тканям. Если насекомое поест такое растение, у него подавляется переваривание растительных белков (e). Существует и более необычный тип индуцибельной защиты. Когда на ситкинскую иву нападают определенные гусеницы, ее листья изменяются так, что их питательная ценность для вредителей снижается; причем эти изменения происходят не только в том дереве, которое подверглось «атаке», но и в соседних деревьях ивы. Возможно, деревья выделяют летучие вещества, подобные феромонам насекомых, и с их помощью предупреждают других особей своего вида об опасности (f).

стадии — личинки, куколки и имаго (взрослого насекомого); у некоторых насекомых не одна личиночная стадия, а несколько. Однако существуют и такие насекомые, в развитии которых нет морфологически различающихся стадий: только что появившиеся на свет особи внешне уже похожи на взрослых насекомых и в процессе развития они лишь многократно линяют, каждый раз увеличиваясь при этом в размерах. Ключевую роль в развитии насекомых играют гормоны двух типов. Это ювенильные гормоны, которые образуются у личинок, и целая группа гормонов линьки, получивших общее название экдистероидов, которые инициируют линьку в процессе развития насекомого.

Экдистероиды были впервые получены А. Бутенандтом из Института биохимии им. Макса Планка в Мюнхене и П. Карлсоном из Тюбингенского университета. Из почти 1000 кг коконов тутового шелкопряда они выделили 25 мг экдистероида, названного экдизоном, и 0,3 мг другого гормона — 20-гидроксиэкдизона. Вскоре К. Наканиси, который сейчас работает в Колумбийском университете, и Т. Такемото из Университета в Токусима обнаружили, что превосходным источником экдизоноподобных веществ могут служить некоторые растения. Всего из 2,5 г высушенных корневищ (корневище — это подземный орган растения, в котором запасаются питательные вещества) обыкновенного папоротника *Polypodium vulgare* им удалось выделить 25 мг 20-гидроксиэкдизона. Это открытие вдохновило многих исследователей на поиски других фитоэкдизонов (т. е. экдистероидов растительного происхождения). В результате таких исследований было получено несколько десятков различных по структуре соединений, причем некоторые из них обладали более сильным действием, чем аналогичные вещества насекомых.

Исследования, проведенные недавно в Кении И. Кубо и его коллегами из Калифорнийского университета в Беркли, показали, что фитоэкдизоны играют в растениях защитную роль: у насекомых, нападающих на растения, в которых синтезируются фитоэкдизоны, под действием этих веществ нарушается ход развития. Было обнаружено, что после опустошающих набегов полчищ саранчи из всей растительности саванны выживал единственный вид — дубровка *Ajuga reptans*. Если насекомых кормили экстрактами *A. reptans*, то их развитие протекало ненормально: при метаморфозе личинки в куколку образовывалась не одна, а несколько головных капсул.



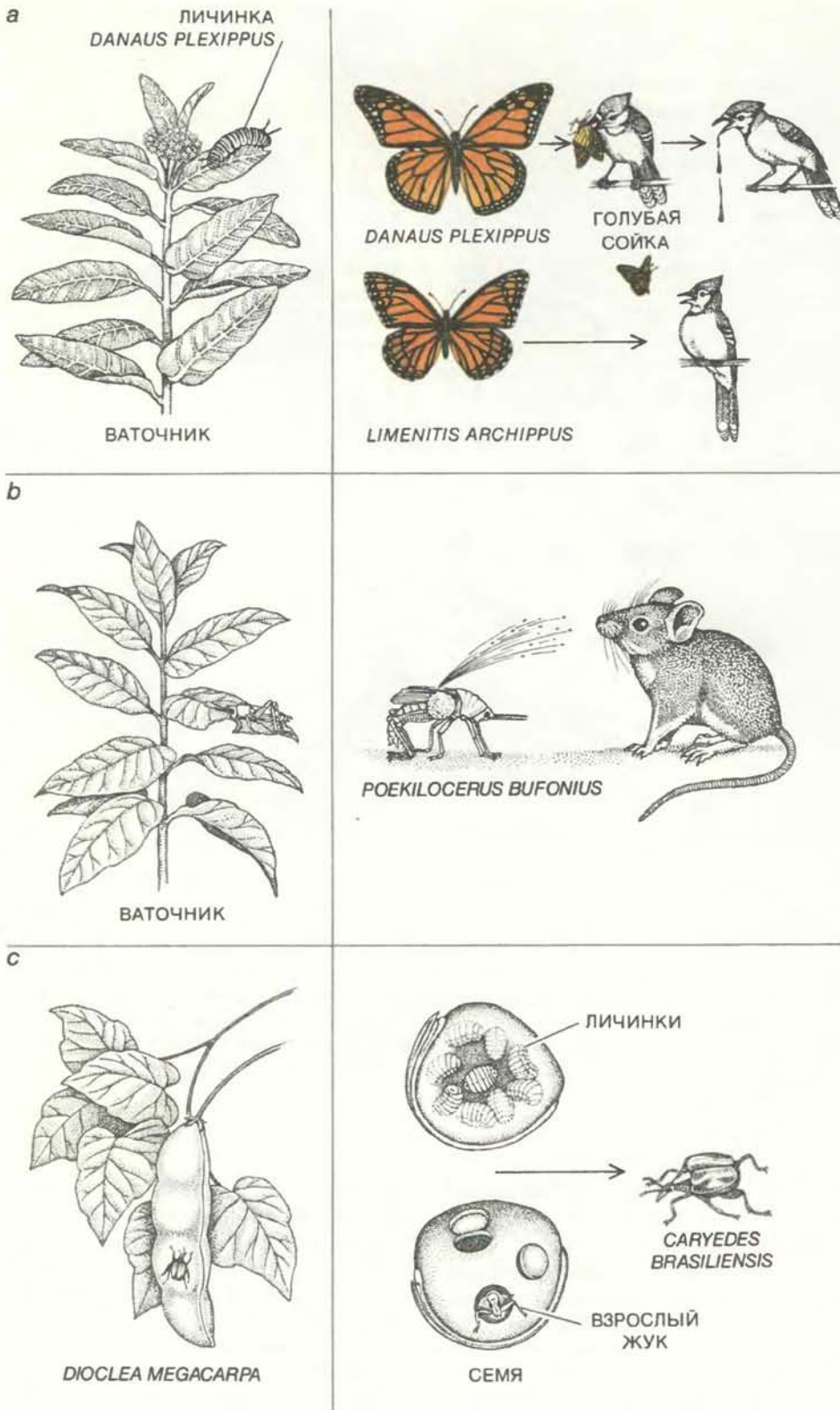
СПОСОБНОСТЬ К ОБРАЗОВАНИЮ ЦИАНИДА свойственна не всем растениям лядвенца рогатого. В сравнительно теплых районах у большинства растений синтезируются как цианогенные гликозиды, так и ферменты, необходимые для освобождения из них цианида. (На круговых диаграммах доля таких растений обозначена черным цветом.) В областях с более холодными зимами (цветными линиями изображены изотермы, на которых указана среднеянварская температура в градусах Цельсия) существенно меньше растений, способных к образованию цианида. В этих районах, где зимние холода ограничивают численность травоядных вредителей, растениям нет необходимости прибегать к химическим средствам защиты.

Лишние головные капсулы закрывали ротовой аппарат, так что личинки не могли есть и гибли от голода. Кубо установил, что такая аномалия развития вызвана действием нескольких образующихся у представителей *A. remota* фитоэкдизонов, которые нарушали процесс превращения личинки в куколку. У каждого насекомого происходили нормальные изменения и перемещения клеток, соответствующие началу метаморфоза, однако личиночный экзоскелет не сбрасывался.

Подобно тому как *A. remota* использует для защиты от врагов аналоги экдистероидов, так некоторые другие растения используют аналоги ювенильных гормонов. У многих насекомых ювенильный гормон играет ведущую роль в процессе развития. До тех пор пока в организме растущей личинки образуется ювенильный гормон, экдистероиды вызывают пере-

ход от одной личиночной стадии к другой, однако окукливания не наступает — для этого необходим распад ювенильного гормона. Ювенилоиды — аналоги ювенильных гормонов, образующиеся в растениях, — могут выступать в роли защитных средств растения, если приводят к гибели насекомого. Если же действие их для насекомого несмертельно, они лишь продлят его личиночную стадию, а она как раз, по иронии судьбы, является наиболее разрушительной для растения фазой жизненного цикла насекомого.

ПЕРВЫЕ ювенилоиды были открыты в 1964 г., когда К. Слама из Института энтомологии Чехословацкой академии наук совместно с К. Вильямсом из Гарвардского университета начал исследования биологии встречающегося в Европе клопа *Pyrrhocoris apterus*. В норме развитие *P. apterus* от яйца до имаго протекает



ОТВЕТ НАСЕКОМОГО на химическую защиту растения часто включает в себя использование тех самых веществ, которые были предназначены, чтобы отпугивать или убивать вредителя. Личинки бабочки *Danaus plexippus* (a) питаются ваточником *Asclepias curassavica*, в котором образуются токсины, получившие название карденолидов. Бабочки накапливают в своем организме карденолиды и становятся непригодными в пищу для голубых соек: съев такую бабочку, сойка сильно заболевает и в дальнейшем будет избегать их. В организме бабочки *Limenitis archippus* не содержится токсинов, но по внешнему виду она похожа на *D. plexippus*, поэтому сойки ее тоже избегают. У прямокрылого *Poekilocerus bufonius* (b), также питающегося ваточником, карденолиды накапливаются в ядовитой жидкости, которую оно, защищаясь, выбрызгивает на врагов. Личинки жука *Caryedes brasiliensis* (c) питаются семенами *Dioclea megacarpa*, содержащими L-канаванин, который обладает инсектицидным действием. Но личинки живут внутри семян и питаются ими благодаря тому, что способны расщеплять канаванин, так что его азот включается в обмен веществ.

в 5 стадий. Слама и Вильямс обнаружили, что у насекомых, выращенных в Гарварде, после пятой стадии не наступает линьки, в результате которой формируется взрослое насекомое. Вместо этого появляются дополнительные стадии развития — шестая, а иногда даже седьмая. В Чехословакии Слама никогда не наблюдал подобной картины развития этих клопов.

В ходе исследований стало ясно, что аномалия в развитии, скорее всего, связана с тем, что насекомые подвергались действию ювенильного гормона, который препятствовал окончательному метаморфозу. Эксперименты показали, что фактором, вызывающим нарушение развития, была бумага в чашках Петри, в которых выращивали клопов. Исследователи проверили несколько различных сортов бумаги и обнаружили, что бумага многих американских газет и журналов вызывает ту же аномалию развития, тогда как аналогичные сорта бумаги, но производимые в Европе и Японии, таким действием не обладают. (В Чехословакии Слама выстилал чашки Петри фильтровальной бумагой, сделанной в Европе.) Сламе и Вильямсу удалось выделить активный фактор из американских бумажных полотенец. Они установили, что он эффективно действует только на представителей семейства Ругтхосигидеи и совершенно не влияет на развитие клопов близкородственного семейства Lygaeidae.

Исследователи определили происхождение фактора, выяснив, из какой древесной массы была сделана бумага. Древесная масса, полученная из балзамической пихты (а именно она служит основным сырьем в производстве целлюлозы и бумажных изделий в Северной Америке), обладала наибольшей активностью. Несколько лет спустя У. Бауэрс, работавший тогда на Нью-Йоркской сельскохозяйственной опытной станции, выделил и охарактеризовал активный фактор. Он назвал его ювабионом. По структуре это вещество похоже на ювенильные гормоны насекомых.

Через некоторое время после открытия ювабиона Бауэрса заинтересовался вопросом: не существует ли у каких-либо растений другого способа защиты — не с помощью синтезируемого самим растением аналога ювенильного гормона, а просто путем блокирования его действия. Вещество-антагонист ювенильного гормона могло бы убивать личинок насекомого, вызывая преждевременную линьку и переход в стадию имаго. Ему удалось выделить два таких вещества из распространенного в умеренных широтах небольшого растения *Age-*

ratum houstonianum. Он назвал эти соединения прекоцен I и прекоцен II, потому что они вызывают преждевременный метаморфоз, прекращая секрецию ювенильного гормона (от англ. precocious — преждевременно созревший). Кроме того, прекоцен II имеет и другие эффекты: у американского таракана он прекращает образование половых аттрактантов, у колорадского жука вызывает состояние «спячки», называемое диапаузой, а у целого ряда насекомых приводит к тому, что самки начинают откладывать неоплодотворенные яйца. Если насекомым, которым в пищу давали прекоцен II, затем добавить ювенильный гормон, то действие прекоцена снимается.

Растения могут синтезировать много других соединений, имитирующих вещества, секретлируемые в организме насекомых и необходимые для их жизнедеятельности. Например, персиковая тля *Myzus persicae*, питающаяся такими растениями, как дикий картофель, при нападении хищника выделяет летучее вещество — феромон тревоги, — которое служит сигналом для других тлей, предупреждая их о грозящей опасности. Важной составной частью феромона тревоги персиковой тли является соединение (E)- β -фарнезен. Р. Гибсон и Дж. Пикет из Ротамстедской опытной станции (Великобритания) обнаружили, что оно же выделяется из трихом листьев дикого картофеля *Solanum berthaultii*, образующего клубни. Тем самым растение отпугивает своего главного вредителя, имитируя его сигнал тревоги. Насекомому трудно противостоять защите такого типа или адаптироваться к ней (скажем, перестав воспринимать (E)- β -фарнезен), потому что этот химический сигнал играет решающую роль для выживания данного вида и тли не могут без него обойтись.

НЕКОТОРЫЕ насекомые, однако, сумели приспособиться к химическим средствам защиты растений. Во многих случаях их адаптация поистине удивительна: насекомое запасает и даже с успехом использует химическое вещество, которое растение применяет для защиты.

Одним из примеров таких насекомых может служить прямокрыло *Poecilocus bufonius*, питающееся исключительно растениями семейства ваточников *Asclepiadaceae*. В ваточниках образуется ряд сложных соединений, называемых карденолидами, которые представляют собой токсины, вызывающие серьезные нарушения сердечной деятельности.

Когда *P. bufonius* подвергается на-

падению, оно защищается, выбрасывая из особой железы яд. Анализ яда показал, что в его состав входят два основных карденолида — калактин и калотропин. Оба этих соединения содержатся также в растениях семейства ваточников, которыми питается *P. bufonius*. Если это насекомое кормить не ваточниками, а иной пищей, то концентрация карденолидов в защитном яде снизится в 10 раз. Следовательно, источником защитных веществ для насекомого служат соединения, образующиеся в поедаемых им растениях.

Открытие того, что в природе существуют такие насекомые, как *P. bufonius*, способные запасать и использовать защитные вещества растений, позволило Уиттейкеру и Фини разработать концепцию об аллелохимических веществах. Они подразделили их на несколько групп. К наиболее важным относятся алломоны — вещества, дающие адаптивное преимущество организму, в котором они образуются, и кайромоны, дающие преимущество тем организмам, которые их получают или потребляют. В случае *P. bufonius* и ваточников химическое соединение, а именно карденолид, которое исходно можно было отнести к алломонам, становится функциональным кайромоном, поскольку оно приносит пользу насекомому, поглощающему его с пищей.

Адаптацию *P. bufonius* к химическим веществам ваточников можно рассматривать как случай коэволюции. Коэволюция — это реципрокный процесс, при котором специфические черты одного организма влияют на развитие свойств и характерных особенностей другого организма. Каждый из взаимодействующих видов оказывается в роли фактора, создающего давление отбора, которое влияет на эволюцию другого вида, в результате чего изменяются их геномы. Нередко коэволюционные связи между растениями и насекомыми достигают паразитической специализации. Например, некоторые цветки могут опыляться насекомыми только одного вида, в свою очередь и этот вид насекомых сохраняет абсолютную «верность» цветкам «своего» растения, посещая только их. Интересно восстанавливать ход событий и выяснять, как далеко (по сравнению с исходными формами) зашла взаимозависимая эволюция высших растений, растительных насекомых и других насекомых-вредителей. Что касается защитных химических веществ, то, вероятно, их появление было одним из этапов развития защиты высших растений от травоядных животных. У травоядных же выработалась

способность либо просто избегать такие растения, либо обезвреживать защитные химические вещества. В ответ на изменения вредителя растения приспособлялись, повышая эффективность действия аллелохимических веществ. А некоторые насекомые достигли такого совершенства, что алломоны растений стали для них кайромонами.

ДРУГОЙ пример насекомого, которому химическое средство защиты растений служит кайромоном, — бабочка *Danaus plexippus* из семейства данаид (*Danaidae*). В 1967 г. Л. Брауэр (в настоящее время сотрудник Флоридского университета) заметил, что если личинок этой бабочки кормить ваточником *Asclepias curassavica*, в котором запасается много карденолидов, то взрослые бабочки становятся неприемлемой пищей для голубых соек (см. Brower L. *Ecological Chemistry*, "Scientific American", February, 1969). Сойки, съевшие не только целых бабочек, но даже отдельные органы, сильно заболели. Обнаруженное Брауэром явление согласовалось с наблюдениями других исследователей, установивших, что бабочек подсемейства *Danainae*, к которому относится и *D. plexippus*, по внешнему виду избегают многие насекомоядные птицы. Брауэр проанализировал химический состав взрослых особей и куколок *D. plexippus*, и оказалось, что в них содержится около десяти различных карденолидов; общее содержание токсинов в туловище бабочки в несколько раз превышает количество, необходимое для того, чтобы убить кошку или небольшую собаку. Насекомые редко запасают все карденолиды «своего» растения, однако все те карденолиды, которые накапливаются в организме насекомого, непременно содержатся в соответствующем растении. Бабочки, которые вывелись из личинок, выращенных на пище без карденолидов, не вредны для голубых соек.

Бабочка *D. plexippus* имеет предупреждающую окраску. Ярким цветом и броским рисунком на крыльях она как бы извещает всех о том, что ядовита. Существование таких насекомых вызвало к жизни явление подражания, называемое мимикрией. Многие насекомые, например бабочка *Limenitis archippus* (Cramer), сами не содержат карденолидов, но внешне похожи на тех насекомых, которые их накапливают. Насекомые-подражатели, или миметики, оказываются как бы под защитой своих моделей; при этом им не надо самим синтезировать токсичные вещества, регулировать их образование, хранить и использовать.

Новый интересный аспект проблемы взаимоотношений между организмами выявился в полевых исследованиях Брауэра в центральной Мексике, где зимует большое количество бабочек *Danaus plexippus*. В этой зоне более 60% этих бабочек истребляется двумя видами насекомоядных птиц — чернопинным трупалом и черноголовым толстоносом. Детальное исследование этих видов показало, что они питаются по-разному. Трупал, чувствительный к карденолидам, выедает у насекомого только грудные мышцы и содержимое брюшка, не затрагивая кутикулу (наружный покров туловища) и крылья, в которых накапливаются карденолиды. Толстонос, напротив, значительно менее чувствителен к этим токсинам и ест без разбору, жадно поглощая брюшко насекомого целиком. Но, конечно, никакая защита не абсолютна, так что химические вещества не обеспечивают полной безопасности ни бабочкам *D. plexippus*, ни ваточникам.

ОДНИМ из наиболее ярких примеров адаптации насекомого, когда алломон растения играет роль кайромона, служит жук-зерновка *Caryedes brasiliensis* из семейства Bruchidae. Он является единственным потребителем семян бобового растения *Dioclea megacarpa*, которое распространено в лиственных лесах Коста-Рики. Около 13% сухого вещества семян *Dioclea* составляет L-канаванин — аминокислота, которая обычно не входит в состав белков. Это вещество обладает инсектицидным действием.

Д. Джензен из Пенсильванского университета и я обнаружили у *C. brasiliensis* уникальные биохимические приспособления, которые позволяют ему превосходно существовать в казало бы ядовитых семенах в течение всей личиночной стадии развития (см. Розенталь Дж. Адаптация жуков-зерновок к ядовитым семенам, «В мире науки», 1984, № 1). В ходе эволюции у этого насекомого возникли ферменты, превращающие L-канаванин в мочевины и затем в аммиак, азот которого используется для синтеза практически всех аминокислот. Таким образом, потенциально высокотоксичный алломон растения становится кайромоном: L-канаванин удовлетворяет потребность развивающихся личинок *C. brasiliensis* в азоте.

У насекомых существует и иной путь использования химических средств защиты растений. В. Детье из Массачусетского университета в Амхерсте и Л. Шунховен из Вагенингенского университета (Нидерланды), а также другие исследователи обнаружили, что у многих насекомых есть

специальные вкусовые рецепторы, чувствительные к аллелохимическим веществам растений, которыми они питаются. Например, у личинок, поедающих растения семейства розоцветных (Rosaceae), имеются рецепторы к сорбиту — углеводу, который запасается в растениях этого семейства. У других насекомых обычно нет таких рецепторов. Насекомые, снабженные соответствующими рецепторами, могут с помощью обоняния легко найти и узнать химически «вооруженные» растения, к средствам защиты которых они устойчивы или обладают механизмом противодействия.

ДО СИХ ПОР я рассматривал такие аллелохимические вещества, синтез которых в растениях конститутивен, т. е. происходит независимо от того, напал на растение вредитель или нет. Однако возможна и иная ситуация: многие растения прибегают к так называемым индуцибельным защитным веществам: такие соединения образуются в растениях только в ответ на нападение. Блестящий пример приведен в работе К. Райана и его коллег из Университета шт. Вашингтон. Они обнаружили, что если на томаты нападают насекомые с грызущим ротовым аппаратом, то из пораженного участка высвобождается вещество, которое распространяется оттуда по растению и инициирует образование по крайней мере двух типов макромолекул, являющихся ингибиторами протеиназ. Попав в пищеварительную систему насекомого, ингибиторы протеиназ препятствуют распаду белков, содержащихся в съеденных листьях, которые поэтому хуже усваиваются. Таким образом, питательная ценность растения для насекомого существенно снижается. Важный шаг в изучении индуцибельных защитных веществ сделан в исследованиях Д. Родса из Вашингтонского университета, а также Дж. Шульца и Я. Балвина, работавших в Дартмутском колледже. Они пришли к еще более удивительным открытиям. Было установлено, что, когда на ситкинскую иву *Salix sitchensis* нападают насекомые, качество листьев (в данном случае пригодность их в пищу для насекомого-вредителя) ухудшается. Родс заметил, что одновременно то же происходит и с ивами, растущими рядом, но на которые насекомые не нападали. Родс предположил, что от поврежденного дерева исходит сигнал, подобный фермону тревоги насекомых, который распространяется по воздуху и приводит в действие защитные механизмы в соседних деревьях.

Шульц и Балвин решили проверить гипотезу Родса. Они поместили саженьцы сахарного клена *Acer saccharum* в две отдельные вегетационные камеры. Оказалось, что если повредить деревья в одной камере, то в ней как в поврежденных, так и в неповрежденных растениях усиливается синтез таннинов и фенольных соединений, играющих роль защитных веществ, и их содержание становится выше, чем в деревьях, растущих в другой камере. Хотя эти исследования еще не доказали с полной определенностью, что сигналы о необходимости химической защиты могут передаваться от одних деревьев к другим, однако они вызвали огромный интерес ко всем попыткам доказать, что у деревьев существует сообщение посредством веществ, аналогичных феромонам.

ХИМИЧЕСКИЕ и биохимические исследования защитных аллелохимических веществ высших растений могут в дальнейшем внести важный вклад в борьбу с насекомыми — вредителями сельскохозяйственных культур. Недавно в одном из докладов, представленных в Национальной академии наук США, подчеркивалось, что быстро увеличивается число насекомых, устойчивых к применяемым в настоящее время химикатам. Биологические и химические исследования в сфере химической экологии, возможно, приведут к созданию эффективных пестицидов, которые были бы менее вредны для окружающей среды и к которым бы насекомые не так быстро приспосабливались. Природные вещества обладают несомненным преимуществом перед искусственными пестицидами, поскольку эффективность их действия очень высока. Кроме того, они открывают прекрасные возможности для разработки экспериментальных систем, в которых можно было бы проверить способность насекомых справляться с токсичными веществами и искать пути обойти эту способность. На основе природных продуктов в противовес пестицидам могут быть созданы новые методы регуляции численности травоядных вредителей. Следовало бы использовать природные соединения для того, чтобы отпугивать вредителей и не давать им поедать растения или откладывать на них яйца. Не исключено, что в будущем мы научимся выращивать сельскохозяйственные культуры, лишенные веществ, привлекающих травоядных вредителей.

50 и 100 лет назад

SCIENTIFIC
AMERICAN

ЯНВАРЬ 1936 г. Радий — наиболее известный из тех химических элементов, которые обладают свойством спонтанно испускать различное излучение в процессе распада атомов. Это излучение, особенно гамма-лучи, оказалось полезным для лечения рака. В природе радиоактивные изотопы встречаются в чрезвычайно малых количествах, и поэтому очень дороги. Сделанное недавно открытие, позволяющее искусственным путем превращать нерадиоактивные элементы в радиоактивные, является важным достижением физики, которое может оказаться истинным благом для медицины.

Появился первый справочник по аэропортам США, составленный на 1935 г. На 200 страницах перечисляются аэропорты всех штатов приводятся их основные размеры и описывается оборудование; информация сопровождается фотографиями, сделанными с воздуха во всех главных пунктах посадки. Возможно, некоторые карты и справочные данные по аэропортам будут распространяться агентствами воздушных перевозок, подобно тому как карты автомобильных дорог распространяются сейчас агентствами нефтяных компаний.

В нью-йоркском Метрополитен-музее сконструировано небольшое переносное устройство для получения ультрафиолетового излучения; оно создано Дж. Роримером, сотрудником отдела искусства средних веков. Прибор оказался весьма полезным при анализе произведений искусства. Он может представлять интерес также для коллекционеров марок, ювелиров, геологов и всех тех, кто использует в своей работе ближнюю ультрафиолетовую область спектра излучения.

В прошедшем году оказалось возможным с учетом накопленного опыта взглянуть на проблему строительства скоростных автомагистралей. Трех-, четырех- и пятиполосные магистрали, проложенные всего несколько лет назад, уже получили, и притом справедливо, название «дорог смерти». Приходится признать, что в перенаселенных районах, где движение на сверхскоростных дорогах особенно интенсивно, для разделения транспорта, движущегося в противо-

положных направлениях, требуется нечто большее, чем просто белая линия. Возможно, эту роль будет играть разделительная полоса с зелеными насаждениями.

В 1907 г. посевы сои в США занимали площадь 50 тыс. акров, а в 1935 г. — 5 млн. акров. Таким образом, менее чем за 30 лет производство этого ценного сельскохозяйственного продукта, завезенного из Азии, возросло в 100 раз.



ЯНВАРЬ 1886 г. В докладе Геологической службы США отмечается, что горная промышленность США получила исключительно широкое развитие. В горно-обогатительные предприятия вложено не менее 800 млн. долл. в виде производительного капитала, на них работает 400 тыс. человек, а стоимость минерального сырья, добытого в США в 1884 г., составила 413 104 620 долл. Основными по стоимости продуктами переработки являются жирный уголь, чушковый чугун и антрацит.

В настоящее время компания Telegraph Construction and Maintenance Company проводит на восточном побережье Англии эксперимент, который может иметь огромное значение. Уже 8 месяцев несколько лучших специалистов компании находятся вблизи р. Нейз. Ежечасно эти джентльмены связываются по телефону с плавучим маяком, заякоренным в десяти

милях от берега. Между г. Уолтон-он-те-Нейзе и маяком был протянут обычный телефонный кабель и на его обоих концах установлены телефонная и телеграфная аппаратура. Ранее считалось невозможным передавать человеческий голос на расстояние 10 миль, особенно в плохую погоду. Сейчас стало ясно, что это осуществимо. Телефонная связь с маяками окажется настоящим благом для моряков и торговцев. Джентльмены, находящиеся в Уолтоне, утверждают, что телефон может действовать и на гораздо большем расстоянии.

Голодание, полуголодная диета, щелочи, турецкие бани, очищающие клизмы, физические упражнения и прочие тысяча и один способ сбросить лишний вес оставляют в отчаянии значительную часть наших тучных сограждан. Дж. Си дает свой рецепт: «О, вы, толстые, горящие желанием похудеть, не ешьте много мяса, но пейте вволю чая».

Движение повозок с помощью пара стало серьезным практическим достижением. До сих пор мы привыкли видеть тяжелые локомотивы весом несколько тысяч фунтов, которые тянут вагоны со скоростью лошади и больше всего напоминают уличные катки. Гг. Дион, Бутон и Трепарду стали производить повозки с паровым двигателем всевозможных видов и размеров, от трехколесных велосипедов до огромных омнибусов и грузовых фургонов. Гравюра внизу изображает один из выпускаемых фирмой фазтонов — элегантную, легкую и прочную коляску. Скорость экипажа — 18 миль в час; вместе с шестью пассажирами и машинистом он весит 3960 фунтов.



Паровая пассажирская коляска

Масс-спектрометрический метод радиоуглеродной датировки с использованием ускорителя

Радиоактивный изотоп ^{14}C может быть отделен от других атомов в образце, что позволяет более точно определять возраст образца, даже если он имеет малую массу

РОБЕРТ Е. М. ХЕДЖЕС, ДЖОН А. ДЖ. ГАУЛЕТТ

РАДИОУГЛЕРОДНАЯ датировка (РД) является основным методом, с помощью которого археологи и антропологи определяют возраст органических остатков. Известно, что радиоактивный изотоп углерода ^{14}C входит в молекулярную структуру живых организмов. Поскольку число радиоактивных атомов постоянно уменьшается с определенной скоростью, то такие атомы могут служить «часами», которые дают возможность установить, как давно умерло то или иное растение или животное. Именно на использовании этих «часов» и основан обычный метод РД.

Несмотря на большое значение этого метода, он имеет серьезные ограничения. Одно из них состоит в том, что для получения надежных данных требуется относительно большое количество исследуемого материала, тогда как многие ценные археологические находки представлены в весьма небольших количествах. Предметы же достаточно крупные могут иметь сложную «углеродную историю», поскольку различные периоды могли оказать свое «влияние» на полное содержание углерода в этих предметах, пока они не превратились в археологический объект. Более того, уже после этого предмет мог оказаться загрязненным «современным» углеродом. Хотя существуют сложные лабораторные способы очистки образцов от таких позднейших наслоений, применение этих способов требует еще большего количества исследуемого археологического материала.

Обычный метод РД ограничен тем, что допускает надежную датировку находок, возраст которых не превышает 40 000 лет. Радиоактивное излучение более древних предметов трудно отличить от фонового излучения. Такое ограничение весьма огорчительно для археологов и антропологов, поскольку между 75 000 и 25 000

лет назад появился современный человек, а также происходили важные изменения климата и фауны.

В настоящей статье рассматривается новый метод РД, свободный от этих ограничений. В нем используется ускоритель частиц совместно с масс-спектрометром. Этот метод позволяет непосредственно подсчитывать число изотопов ^{14}C вместо измерения скорости их распада и поэтому требует намного меньшего количества исследуемого образца по сравнению с обычным методом РД. Несмотря на то что по своему рабочему диапазону и точности новый метод пока сравним с обычным методом РД, в скором будущем его рабочий диапазон будет, вероятно, удвоен, а точность увеличена в два раза.

В органическом веществе примерно один из каждого триллиона (10^{12}) атомов углерода является атомом ^{14}C . Хотя в большинстве случаев ^{14}C химически неотличим от двух других изотопов углерода (^{12}C и ^{13}C), он может быть обнаружен по радиоактивности при его распаде до изотопа азота ^{14}N .

Скорость, с которой происходит распад радиоактивных изотопов, выражается периодом полураспада. Период полураспада ^{14}C составляет примерно 5700 лет. Это означает, что образец, первоначально содержащий 10 000 атомов ^{14}C , через 5700 лет будет содержать только половину этого количества, т. е. 5000 атомов ^{14}C (остальные 5000 атомов распались до ^{14}N). По прошествии еще 5700 лет останутся только 2500 атомов ^{14}C и т. д. Зная первоначальное количество ^{14}C в образце, можно легко подсчитать возраст этого образца, определив число периодов полураспада, приведших к остаточному уровню радиоактивности ^{14}C .

Первоначальное процентное содержание атомов ^{14}C в любом органическом веществе хорошо известно. Это

объясняется тем, что количество ^{14}C в биосфере оставалось на протяжении тысячелетий практически неизменным. Этот изотоп постоянно образуется в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космических лучей с атомами азота. Соединяясь с кислородом, ^{14}C образует радиоактивную двуокись углерода, которая проникает в нижние слои атмосферы и попадает в биосферу главным образом в процессе дыхания растений. Из растительной ^{14}C попадает через пищевую цепь в высшие организмы, включая человека. Совместный эффект радиоактивных потерь и новых образований в стратосфере привел к постоянной, хотя и незначительной, равновесной концентрации ^{14}C в биосфере. Поэтому каждый живой организм имеет (и имел) одинаковое отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в своих тканях.

После смерти организма потребление углеродных соединений прекращается, поэтому в результате радиоактивного распада количество ^{14}C в его тканях начинает уменьшаться. Если остатки организма не загрязнены «современными» атомами ^{14}C (содержащимися, например, в отложениях бактерий), то для определения времени смерти этого организма достаточно измерить отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

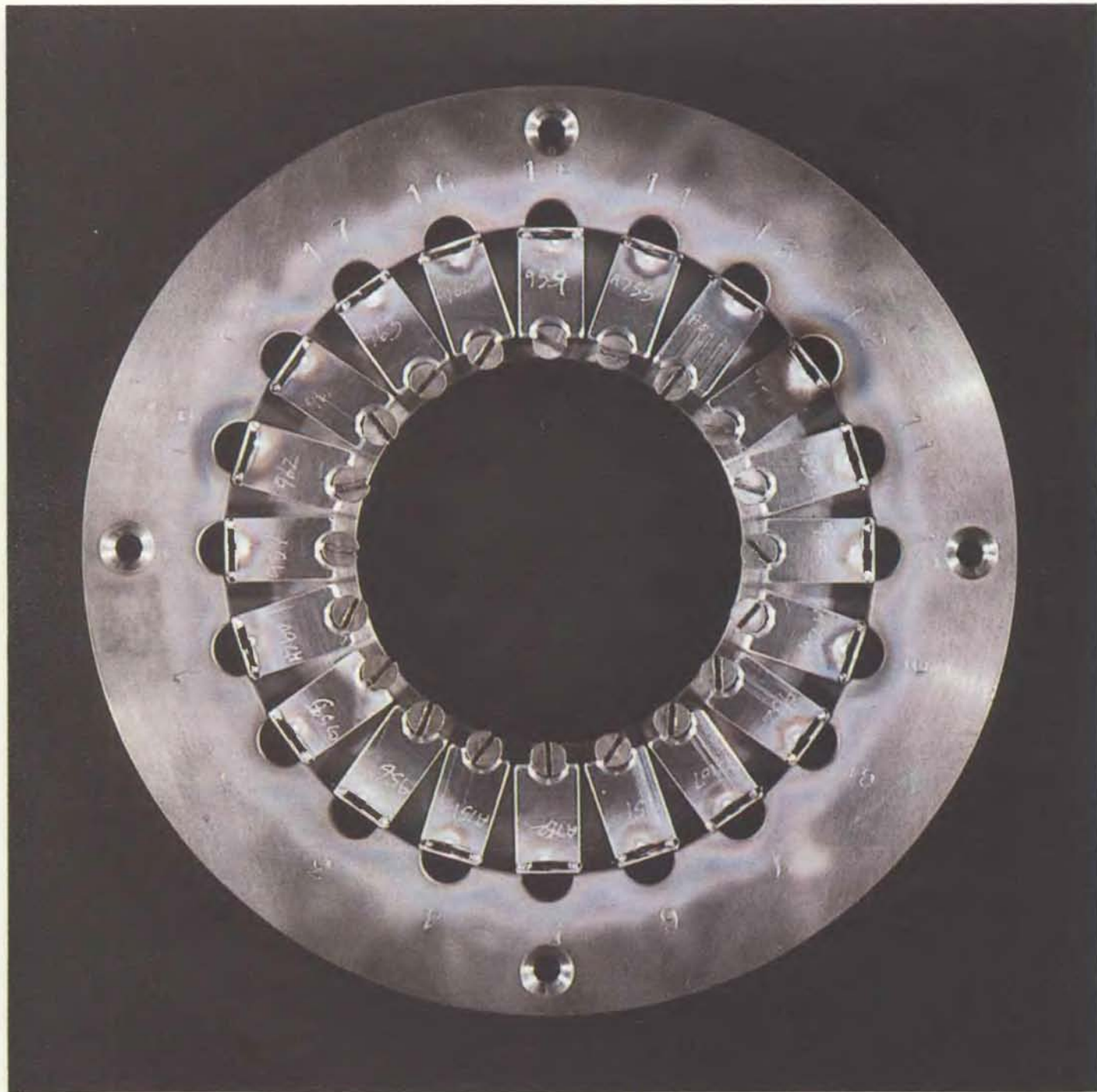
Радиоуглеродная датировка образцов дерева сравнивалась с результатами подсчета годовых колец в образцах (дендрохронология). Оказывается, что отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ не всегда строго постоянно. Интенсивность космических лучей, благодаря которым ^{14}C образуется в верхних слоях атмосферы, зависит от возмущений магнитного поля Солнца и, возможно, от флюктуаций магнитного поля Земли. В любом случае в отношении $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ может быть внесена поправка на эти отклонения. Более серьезная проблема состоит в том, что для определения содержания ^{14}C в образце обычным методом — измерением

радиоактивности — требуется относительно большое количество исследуемого материала.

Слабое излучение ^{14}C трудно отличить от фонового излучения (вызванного главным образом космическими лучами). Обычно остаточная радиоактивность ^{14}C в образце, возраст которого превышает 37 000 лет, слишком мала по сравнению с уровнем фонового излучения и поэтому трудно

отличима от последнего. В результате для измерения спонтанного излучения даже самыми чувствительными приборами необходимо большое число атомов ^{14}C (или продолжительное время измерения). Еще большее число этих атомов требуется для определения возраста образца с повышенной точностью. (Точность подсчитанного возраста обратно пропорциональна квадратному корню из числа «подче-

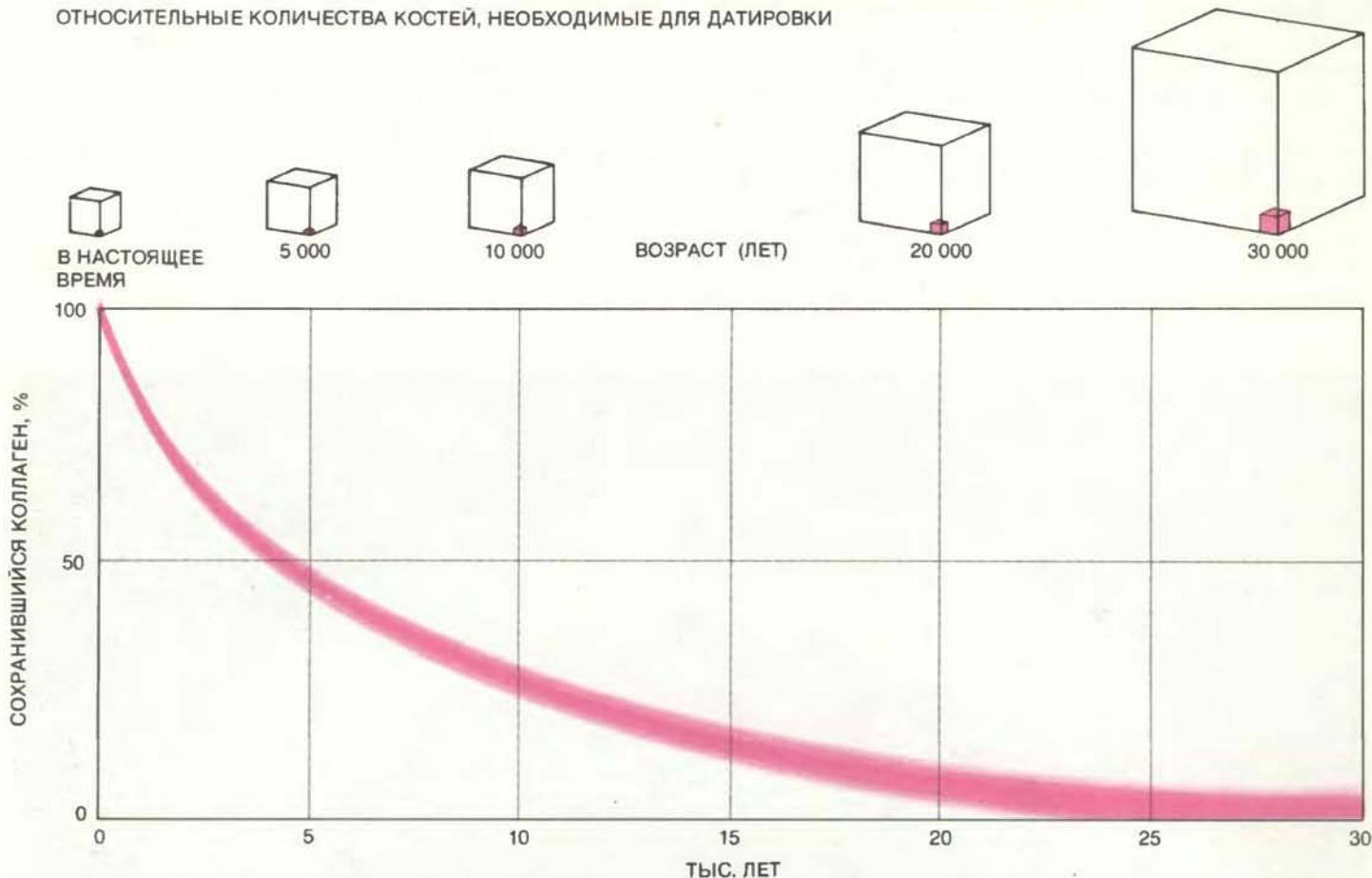
тов» радиоактивности.) Для измерения распада примерно 10 000 атомов ^{14}C в течение времени, достаточного для определения возраста с точностью до 80 лет, необходимо от 1 до 5 г чистого углерода. Чтобы получить такое количество углерода, необходимо образец органического вещества гораздо большей массы — от 25 до 1000 г — в зависимости от содержания углерода в образце.



КРУГ С ОБРАЗЦАМИ в радиоуглеродном ускорителе содержит 20 металлических лепестков с углеродными образцами, приготовленными для датировки (а также образцами известного возраста или содержания ^{14}C для калибровки). Углерод нанесен в виде тонкого графитового слоя на поверхности короткой танталовой проволоки, находящейся в углублении на внешней стороне каждого лепестка. Круг

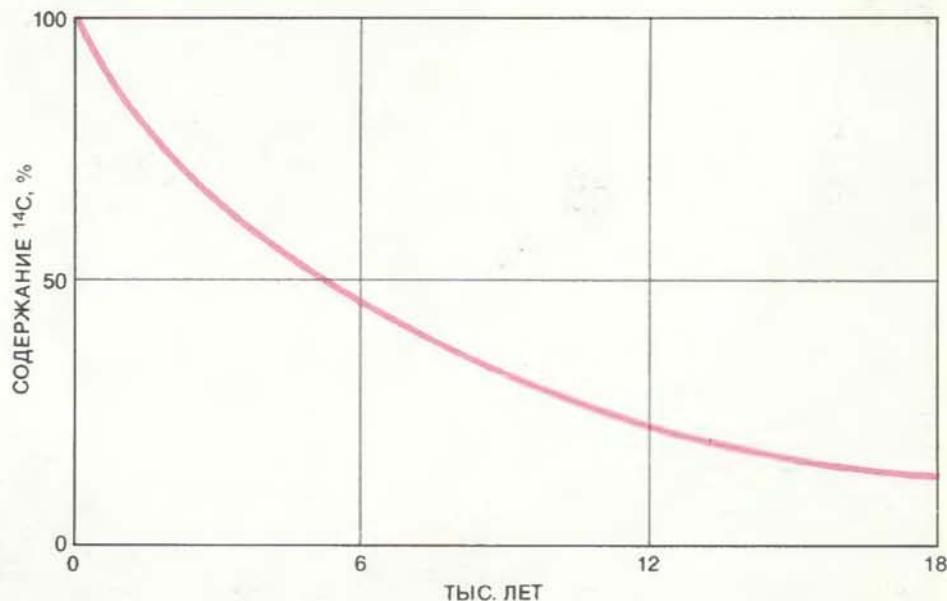
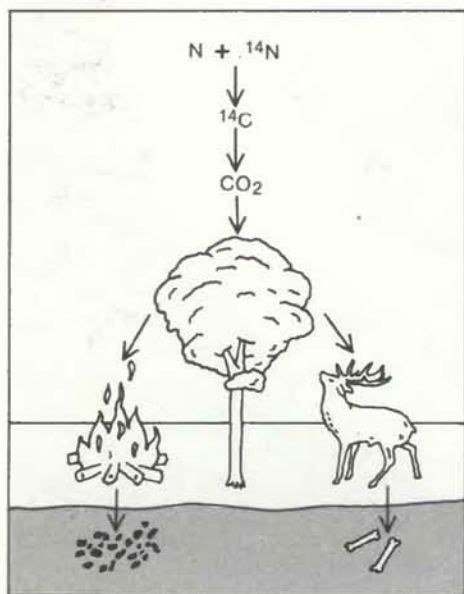
(изображен примерно в натуральную величину) помещается в ионный источник ускорителя, где происходит последовательная ионизация каждого образца (см. рисунок на с. 68). Атомы ^{14}C отделяются от остальных ионов и подсчитываются; число этих атомов является показателем возраста образца.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ КОЛИЧЕСТВА КОСТЕЙ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ДАТИРОВКИ



КОЛИЧЕСТВО КОСТЕЙ, необходимое для радиоуглеродной датировки, зависит от возраста этих костей, их состояния и метода датировки. Масс-спектрометрический метод РД (цветные кубики) требует в 1000 раз меньшее количество костей, чем обычный метод РД (большие кубики), независимо от их возраста. Для того чтобы исключить «современный» углерод, который занижает возраст образца,

содержание ^{14}C определяется в очищенных аминокислотах, полученных из коллагена кости. Поскольку коллаген разрушается со временем (нижний график), то чем больше возраст кости, тем больше требуется этого вещества. Уширение кривой связано с тем, что содержание коллагена в костях может меняться в зависимости от условий их сохранения.



РАДИОАКТИВНЫЙ ИЗОТОП ^{14}C образуется в небольших количествах при взаимодействии нейтронов космических лучей с атомами азота в атмосфере. ^{14}C соединяется с кислородом, образуя двуокись углерода. Как и обычная двуокись углерода (содержащая ^{12}C), радиоактивная форма попадает в биосферу в результате дыхания растений. Через пищевую цепь ^{14}C оказывается в тканях высших организмов. Непрерывное поступление ^{14}C в биосферу, сбалансированное непрерывными потерями в результате радио-

активного распада, приводит к относительно постоянной концентрации ^{14}C во всех растениях и животных. После смерти организма количество ^{14}C в его тканях начинает уменьшаться в результате радиоактивного распада. Поскольку концентрация ^{14}C в живых организмах известна, возраст органических остатков может быть найден путем измерения содержания в них ^{14}C и определения периода времени, за которое произошел распад остальных атомов ^{14}C .

ПОНЯТНО, что намного большей эффективностью обладал бы метод, основанный на отделении атомов ^{12}C и ^{13}C от атомов ^{14}C в образце известной массы и последующем подсчете всех атомов ^{14}C . Повышение эффективности метода позволило бы расширить хронологическую протяженность и повысить точность датировки. Именно это нам удалось частично осуществить в Оксфордском университете с помощью масс-спектрометра, объединенного с ускорителем частиц.

В используемом методе сначала ионизируются атомы углерода, содержащиеся в образце, которые затем ускоряются до энергий около 10 МэВ. Траектория ионов высокой энергии, образующих пучок, искривляется магнитным полем, при этом в большей степени искривляются траектории более легких атомов. Это дает возможность отделить атомы ^{14}C от других атомов в образце и определить их число. (Затем определяется количество атомов ^{12}C и ^{13}C по разности между первоначальной массой образца и общей массой подсчитанных атомов ^{14}C .)

В нашем методе был применен ускоритель электростатического типа, в котором атомы углерода ускоряются электрическим полем. Именно поэтому атомы исследуемого образца должны быть сначала ионизованы. В этом ускорителе отрицательные ионы углерода сначала движутся ускоренно в электрическом поле (при ускоряющем потенциале 2,5 МВ) к положительно заряженному преобразователю, а затем, отдав свои электроны, продолжают движение с ускорением, но уже как положительные ионы (см. рисунок на с. 68). Отнимая 4 электрона у ионов углерода, преобразователь заставляет любые примесные молекулярные ионы распадаться на отдельные атомарные ионы. В противном случае многие молекулы с атомной массой 14 были бы неотличимы от атомов ^{14}C .

В масс-спектрометре фокусировка пучка ионов и разделение ионов по их массам осуществляются с помощью магнитного поля. Если ионы, имеющие одинаковые электрический заряд и скорость, но различающиеся по массе, движутся в магнитном поле, перпендикулярном направлению их движения, то при данном радиусе кривизны траектории этих ионов в приемную щель попадут только те из них, которые имеют одинаковую массу. Таким образом, магнитное поле служит для отделения всех заряженных частиц от тех частиц, которые имеют атомную массу 14. Вообще говоря, ускоренные ионы не имеют одинако-

вых зарядов и скоростей, поэтому ионы различающиеся по заряду, массе и скорости, попадают в приемную щель, расположенную сзади магнита. Тем не менее, используя в масс-спектрометре два магнита (один — для создания магнитного поля, действующего на ионы до их ускорения, другой — после ускорения), нам удалось уменьшить число посторонних ионов в 10^{10} раз.

Ускоренные частицы проходят через фильтр скоростей, в котором используются постоянные электрические и магнитные поля, перпендикулярные друг другу и пучку ионов. Это позволяет дополнительно уменьшить число посторонних ионов в 1000 раз, прежде чем положительные ионы с атомной массой 14 (т. е. ионы ^{14}C) начинают подсчитываться с помощью регистрирующего устройства. Это устройство может отличать ионы, имеющие одинаковые массу и скорость движения, но различный заряд ядра, по скорости потери ими энергии при их столкновении с молекулами газа. Чувствительность регистрирующего устройства столь высока, что оно может «выбирать» почти все ионы ^{14}C , даже когда их количество в па-

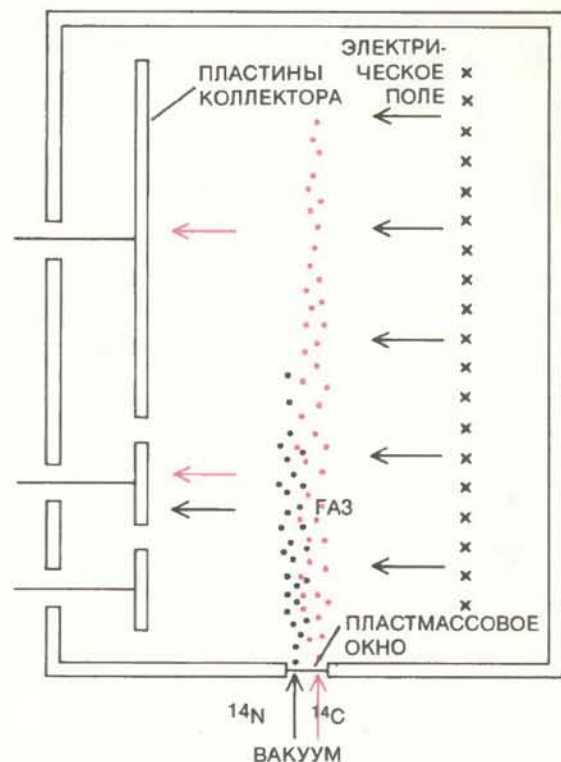
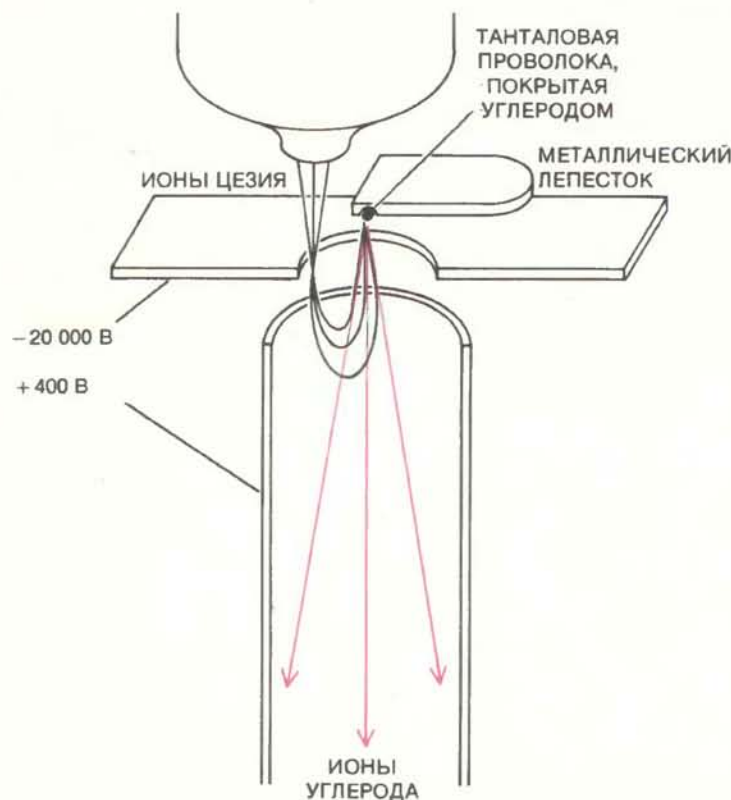
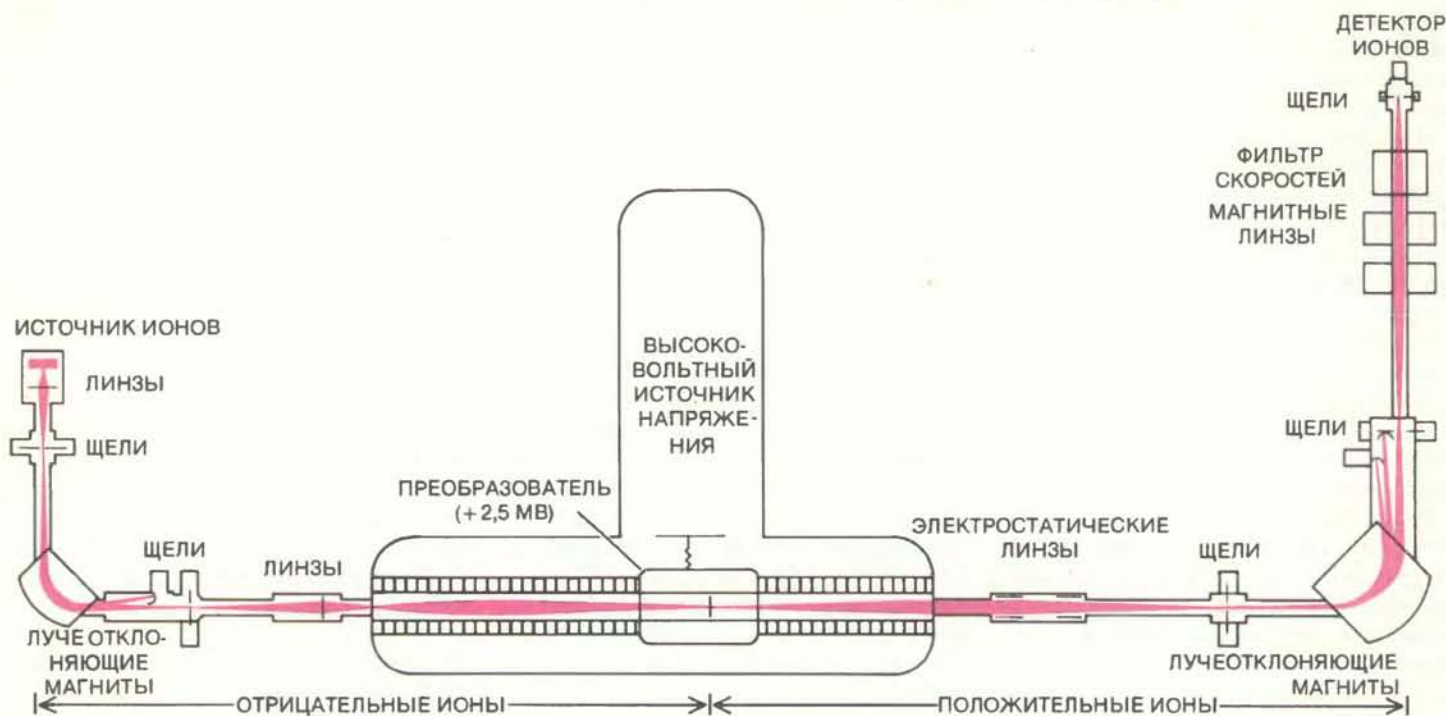
дающем ионном пучке составляет менее 1%, как было в случае образца, имеющего очень большой возраст (около 60 000 лет).

В настоящее время метод масс-спектрометрии с ускорителем позволяет подсчитывать 2% всех атомов ^{14}C в образце «среднего» возраста (т. е. возраст которого составляет примерно 12 000 лет) в течение нескольких часов. Хотя такой результат может показаться незначительным, отметим, что для обнаружения 2% атомов обычным методом потребовалось бы 170 лет независимо от количества образца. Для подсчета 10 000 атомов ^{14}C в образце «среднего» возраста новым методом достаточно 0,5—5 мг чистого углерода, т. е. в 1000 раз меньше, чем требует обычный метод РД.

ПЕРЕД исследованием образца методом ускорительной масс-спектрометрии он должен быть очищен от «постороннего» и «современного» углерода и превращен в графит. Обработывая образец химическими веществами, избирательно взаимодействующими с определенными типами углеродных соединений, можно



ОСНОВНОЕ ОТЛИЧИЕ обычного метода РД (слева) от масс-спектрометрического (справа) состоит в способе измерения концентрации ^{14}C . При обычном методе РД число атомов ^{14}C в образце оценивается по числу радиоактивных распадов за определенный промежуток времени. Излучение ^{14}C (черная стрелка) заставляет молекулу флюоресцирующего красителя испустить вспышку света (красная волнистая стрелка), которая регистрируется фотоумножителем. Естественное фоновое излучение может также вызывать сцинтилляцию молекул красителя, что приводит к искажению результатов. За счет экранирования уровень этого излучения становится меньше уровня радиоактивного излучения образца «среднего» возраста. Однако наиболее древние образцы менее радиоактивны, и их уровень излучения почти такой же, как и у фонового излучения. Для образцов, возраст которых превышает примерно 37 000 лет, «собственное» излучение почти неотличимо от фонового излучения. В масс-спектрометрическом методе РД подсчитываются непосредственно атомы ^{14}C , отделенные от других атомов. Ограничивающим фактором этого метода является химическое загрязнение образца «современным» углеродом.



В РАДИОУГЛЕРОДНОМ УСКОРИТЕЛЕ (вверху) отрицательные ионы углерода движутся с ускорением сначала к преобразователю, к которому приложено положительное напряжение 2,5 МВ; пройдя преобразователь, они приобретают положительный заряд и продолжают движение уже как положительные ионы. Большинство посторонних ионов «отфильтровывается» с помощью двух лучеотклоняющих магнитов. Эти магниты отделяет ионы по массе: более легкие ионы характеризуются большой кривизной траектории. Ионы с атомной массой 14 могут быть отделены с помощью щели, рассчитанной на соответствующий радиус кривизны и установленной на некотором расстоянии от магнита. В источнике ионов (слева внизу) атомы углерода исследуемого образца (напыленного в виде тонкого слоя на поверхность танталовой проволоки) бомбардируются положительными ионами цезия, в результате чего об-

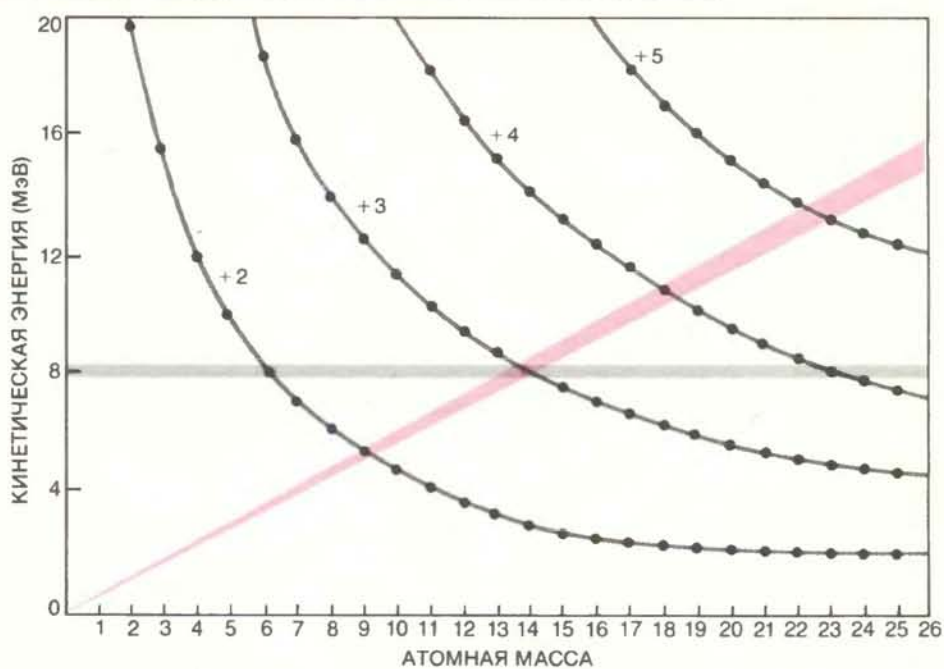
разуются отрицательные ионы углерода. Ионы ^{14}C отделяются в конечном итоге с помощью детектора (справа внизу). После прохождения через пластмассовое окно ускоренно движущиеся ионы попадают в газоразрядную камеру, где порождают следы вторичных ионов. Так как поступающие в детектор ионы имеют одинаковую скорость движения и заряд атома, то скорость взаимодействия между ионами и молекулами газа зависит в основном от заряда ядра иона. Поэтому ионы углерода (цветные точки), имеющие заряд +6, взаимодействуют с меньшей скоростью, чем ионы азота (черные точки), заряд ядра которых равен +7, и проникают в камеру на большее расстояние. Следы вторичных ионов перемещаются под действием электрического поля к пластинам коллектора, где измеряется их средняя длина. По результатам этих измерений находится число ионов ^{14}C .

выделить «подлинный» углеродный компонент данного образца, по которому и определяется его возраст. Например, кости могли абсорбировать органические соединения или подвергнуться химическому воздействию грибов и бактерий. Эти процессы являются источниками «постороннего» углерода в костях, затрудняющего точное определение исходного количества ^{14}C , особенно если возраст образца очень велик. Основным органическим материалом костей является коллаген. Одна из аминокислот, образующих коллаген, — оксипролин — может быть обнаружена главным образом в костях. Поэтому, если приготовлена проба костного оксипролина, можно с уверенностью сказать, что углерод, содержащийся в пробе, был включен в структуру кости во время ее образования, а не впоследствии.

Выделенный углеродный компонент необходимо затем превратить в графит. Для этого мы сначала его сжигаем и получаем двуокись углерода, которую затем превращаем в ацетилен C_2H_2 , оставляющий слой чистого углерода на поверхности нагретой танталовой проволоки.

Для получения отрицательных ионов углерода этот слой бомбардируется положительными ионами цезия. (Такой источник ионов называется распыляемым.) Начиная процесс с отрицательных ионов, мы тем самым почти освобождаемся от посторонних атомов ^{14}N (масса которых примерно равна массе атомов ^{14}C), поскольку азот не может существовать в виде положительных ионов. Хотя распыляемый источник и позволяет получить стабильный поток ионов, которые затем могут ускоряться электрическим полем, только 10% этого источника превращается в ионы. Сейчас мы разрабатываем новый источник ионов, который должен быть не только более эффективным, но и позволит значительно упростить приготовление распыляемого образца химическим способом.

Исходя из того что метод ускорительной масс-спектрометрии позволяет обнаруживать почти любой изотоп с точностью 10^{-9} млн $^{-1}$, можно было бы предположить, что с помощью этого метода возможна датировка образцов, возраст которых равен по крайней мере 80 000 лет. Однако в настоящее время этот метод имеет существенное ограничение, состоящее в том, что во время обработки образца в него попадает «современный» углерод, хотя и в очень небольших количествах. Именно поэтому новый метод РД по своему временному диапазону (40 000 лет) пока не отличается от обычного метода. Однако для пер-



ОТДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ИОНОВ ^{14}C основано на использовании трех устройств — лучеотклоняющего магнита, фильтра скоростей и детектора. Радиус кривой, по которой ионы движутся в магнитном поле, зависит от массы иона, его заряда и скорости движения или кинетической энергии. Ионы (точки), которые проходят через щель, установленную за магнитом, распределены по массе, заряду и кинетической энергии. Графически это распределение выглядит в виде семейства гипербол (черные кривые), где каждому ионному заряду соответствует своя гипербола. Кинетическая энергия ионов, проходящих через фильтр скоростей, линейно зависит от атомной массы (красная линия); поэтому, когда фильтр используется совместно с лучезигибающим магнитом, он «отбирает» один ион в каждой из возможных гипербол. Окончательное отделение ионов ^{14}C (красные точки) происходит в детекторе (серая полоса), регистрирующем только те ионы, кинетическая энергия которых равна 8 МэВ; таким образом происходит отделение ионов ^{14}C .

Возможен из этих методов это ограничение не является неустранимым, поскольку его чувствительность может быть повышена за счет совершенствования способов обработки образца.

В НАСТОЯЩЕЕ время стоимость масс-спектрометрического метода с использованием ускорителя в полтора-два раза превышает стоимость обычного метода. В случае образцов, возраст которых превышает 10 000 лет, точность обоих методов примерно одинакова. Помимо того что существует возможность повысить точность нового метода, основным его преимуществом является то, что он требует в 1000 раз меньшее количество образца, чем обычный метод. Поэтому новый метод более эффективен в том случае, когда размер образца должен быть минимальным для сохранения археологического предмета, когда в распоряжении исследователей имеются только крошечные кусочки материала, а также когда требуется строгое определение стратиграфической позиции или химической характеристики образца.

Многие древние рукописи представляют собой слишком большую цен-

ность, чтобы стать «жертвой» обычного метода РД. Новый же метод в этом отношении является практически безопасным. С помощью него уже был определен возраст небольшой части *mapa mundi* («карты мира»), обнаруженной в герцогстве Корнуолл, относящейся к раннему средневековью, которая сохранилась благодаря использованию ее в качестве книжной обертки. Она оказалась определенно древнее другой известной в Вустерском соборе (Великобритания). Масс-спектрометрический метод РД позволяет, таким образом, проверить многие палеографические датировки (метод, основанный на изучении стиля письма), а также выявить подделки. Первые рукописи Нового Завета или фрагменты древних папирусов были бы идеальным материалом для такого анализа.

Образцы материала для датировки, происходящие из многих археологических памятников, очень часто бывают слишком незначительны по своей массе. Поэтому из таких образцов зачастую составляют один общий образец — большего размера, достаточного для датировки. Недостатком та-

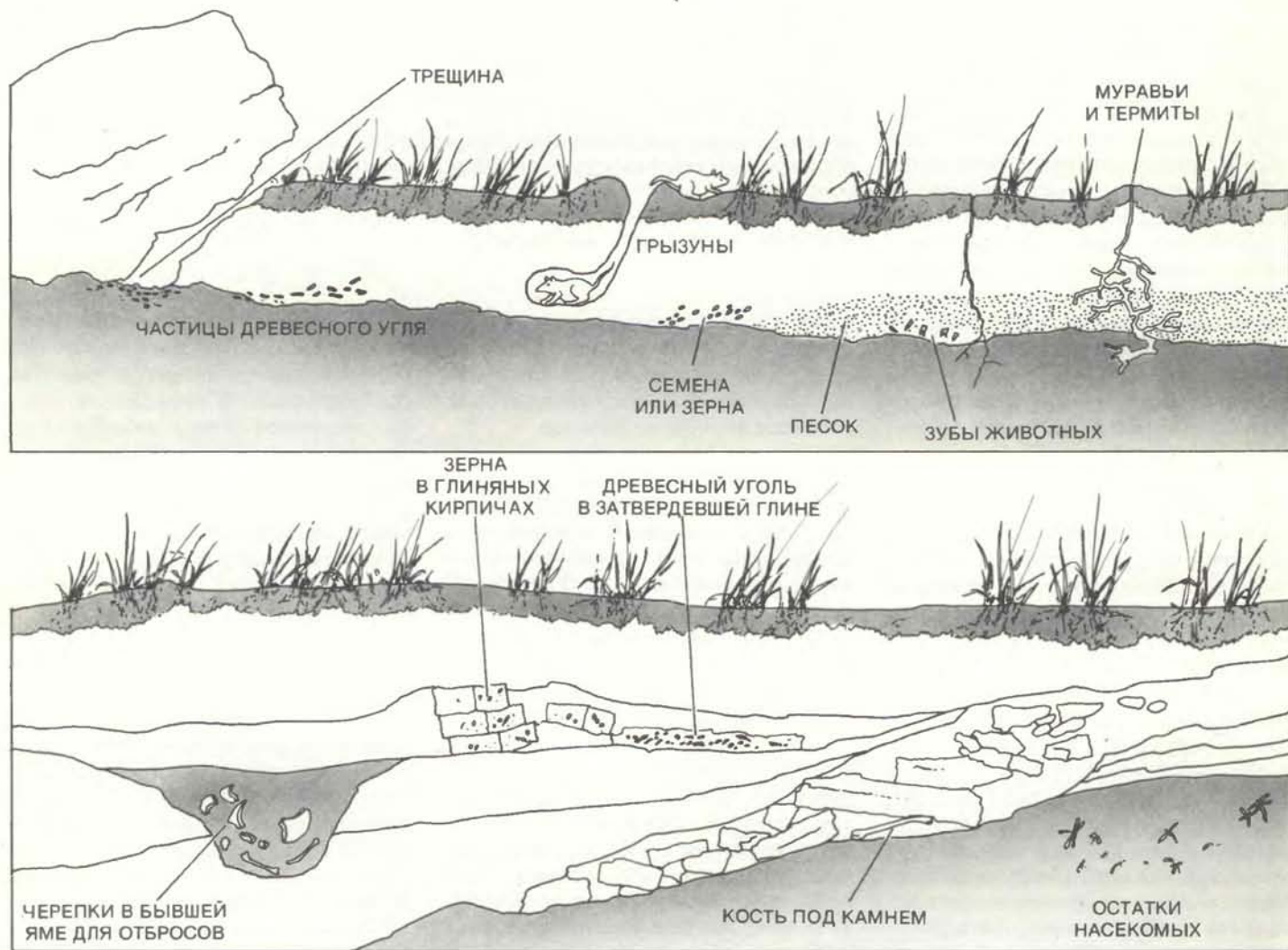
кого способа является то, что смешиваются и совместно анализируются все компоненты образца, имеющие различный возраст. Во многих случаях масс-спектрометрический метод РД позволяет избежать этого и исследовать не смесь образцов, а каждый из них в отдельности. Например, этот метод использовался для определения возраста фрагментов костей и орудий из оленьего рога, изготовленных в эпоху палеолита — более 10 000 лет назад. Согласно оценкам специалистов по древнему искусству, возраст орнаментированной нижней части лошадиной челюсти, обнаруженной в северном Уэльсе сотню лет назад, определялся в широких пределах — от 5000 до 25 000 лет. С помощью нового метода РД было установлено, что возраст этой находки составляет примерно 10 000 лет; таким образом, она стала важным дополнением к каталогу позднепалеолитического искусства. Эта датировка также способство-

вала подтверждению факта существования плейстоценовой лошади в более позднее время.

Наконечники гарпунов из кости или оленьего рога, относящиеся к позднему ледниковому периоду, также являются очень важными предметами. Обычно они доходят до нас хорошо сохранившимися, поэтому для их датировки в качестве образца достаточно взять небольшой кусочек материала, полученного высверливанием. Образцом для датировки каменных орудий каменного века может иногда служить смола, содержащаяся в деревянных рукоятках этих орудий, или веревка, с помощью которой рукоятка привязывалась к обработанному камню. Бронзовые наконечники копий и топоры, относящиеся к более позднему времени, иногда находят с остатками дерева. Возраст наконечника копья, обнаруженного в пещере Джекскар в северной Англии, определялся по измерению содержания ато-

мов ^{14}C в «следах» его древка. Каменный топор-молот, относящийся к раннему бронзовому веку, был найден в торфянике с сохранившимися остатками погребенного леса в Клитхорпсе — на восточном побережье Англии. Интересно, что возраст одного из обнаруженных там пней оказался на 1000 лет меньше, чем молота. Прежде именно по возрасту пней определяли возраст этой находки.

Возраст костяных наконечников гарпунов является важнейшей информацией при воссоздании картины перемещения человека на север Европы в поздний ледниковый период; ценную информацию дает также датировка древесного угля и фрагментов костей северного оленя, находимых на древних стоянках. Стоянок открытого типа намного больше, чем пещерных, однако обнаруживаемые в них фрагменты различных предметов часто не пригодны для определения возраста стоянок обычным методом



КАРТИНА ПОЛОЖЕНИЙ, когда древние органические остатки (например, зубы, кости, древесный уголь или семена растений) должны быть тщательно соотнесены со слоями, прежде чем определять возраст слоев на основе радиоуглеродной датировки. Некоторые из остатков могли попасть в нижние слои в результате деятельности различ-

ных организмов или за счет трещин (вверху). Надежная датировка отложений может быть только в том случае, когда органические материалы оказались «замурованными» в ненарушенном слое. Поскольку такие материалы обычно имеют небольшой размер, то для датировки слоев наиболее подходит новый метод РД.

РД. Напротив, именно с помощью разработанного метода датировки была установлена хронология важнейших стоянок открытого типа в Пинсвенте, Этиоллесе и Масенджи. Как было установлено, возраст стоянки в Пинсвенте составляет немногим более 12 000 лет, что хорошо согласуется с данными, полученными недавно на основе обычного метода РД. Новый метод РД также показал, что стоянка в Пинсвенте на 1000 лет моложе стоянки в Этиоллесе, но старше стоянки в Масенджи. Таким образом, возраст стоянки в Пинсвенте по-видимому, примерно совпадает с возрастом находок, обнаруженных в пещере Гоу в юго-западной части Англии, и возрастом останков лося в Ланкашире: в обоих случаях возраст определялся также с помощью масс-спектрометрического метода РД. Датировка скелета лося позволила установить и возраст пары костяных наконечников, поразивших животного и застрявших в его костях; эти наконечники оказались наиболее древними из всех датированных ранее.

ДАТИРОВКА единичных семян растений или костей животных ранее осуществлялось только по возрасту того археологического слоя, где они были найдены. На этом основании делали вывод о времени начала domestikации животных или окультуривания растений. Однако из-за трещин в почве или же в результате деятельности человека и животных (например, грызунов и червей) распределение образцов органического материала в почве не всегда соответствует относительной хронологии отложения местных слоев. Новый метод РД является идеальным способом для проверки датировок, полученных на базе стратиграфии. Например, анализы, проведенные в нашей лаборатории и лаборатории Аризонского университета, где применялось подобное оборудование, показали, что датировка семян растений и каменных орудий, обнаруженных на месте древнейшего поселения в Египте (возраст — 17 000 лет), на самом деле составляет всего несколько сот лет. Кроме того, возраст семян, обнаруженных на поселениях на Ближнем Востоке, оказался равным многим тысячам лет, хотя эти семена не относились к культурным формам растений. Такая «стратиграфическая избирательность» является важным преимуществом нового метода РД.

Высокая избирательность этого метода определяется также самим способом обработки образца. Поскольку этот метод требует намного меньшего количества углерода, для измере-

ний может быть взят наиболее подходящий образец. Для получения незагрязненного образца, например на основе составляющих аминокислот, может быть использован коллаген костей. Измерение содержания атомов ^{14}C в аминокислотах, выделенных из дентина кусочка слоновой кости, позволяет определить возраст этой кости. Таким образом, по маленьким кусочкам бивней мамонтов, сохранившихся на стоянках, относящихся к палеолиту, может быть более точно определено время вымирания мамонтов в западной Европе. Новый метод РД позволяет также анализировать несколько углеродных соединений, полученных из одного образца. Тем самым можно строить последовательную картину загрязнений углеродом из других источников. Например, анализируя различные липидные фракции, содержащиеся в озерных отложениях, нам удалось отметить различные периоды времени, когда углерод попадал в эти отложения.

ОБЫЧНЫЙ метод РД наиболее успешно применяется для датировки хорошо сохранившихся органических остатков во временной области в 30 000 лет. Вместе с тем за порогом в 20 000 лет число предметов, чей возраст может быть уверенно определен, резко уменьшается. Этот временной порог может быть «отодвинут» в глубь времен с помощью нового метода РД.

Количество «исходных» атомов ^{14}C в кости или кусочке древесного угля, возраст которых составляет примерно 40 000 лет, очень мало: такой образец может содержать только несколько тысяч атомов ^{14}C . Следовательно, даже совсем небольшие количества «современного» углерода могут значительно исказить результаты измерений. Если количество «современного» углерода в образце, возраст которого примерно 25 000 лет, составляет 1%, то этот образец по результатам измерений окажется на 1500 лет «моложе» своего действительного возраста. Такое загрязнение может уменьшить возраст 60 000-летнего образца почти на 50%. Отсюда ясно, насколько важной является очистка от загрязнений древнейших образцов. К сожалению, после необходимой обработки образца его размер становится слишком малым для анализа обычным методом РД. Кроме того, этот метод сталкивается с неразрешимой проблемой отличить радиоактивность самого образца от фонового излучения.

Масс-спектрометрический метод свободен от указанных проблем, по-

этому даже незначительные усовершенствования процесса химической обработки образца могут привести к повышению точности датировок и расширить область хронологических определений. Например, анализ очищенных аминокислот из костей, выполненный с помощью этого метода, показал, что возраст этих костей составляет не 25 000 лет, как считалось ранее на основе обычного метода, а 26 000 лет и более. Датировка этих костей обычным методом была основана на анализе всего коллагена, который мог включать и современный углерод.

Один из наиболее сложных вопросов, в решении которого новый метод РД уже оказывает существенное влияние, касается времени появления первого человека в Новом Свете. Установление времени, в течение которого происходило заселение Америки, является очень важной задачей, поскольку, решив ее, можно было бы оценить, как быстро расселялись первые палео-индейские охотники и собиратели, в каком темпе происходило развитие их этнического и лингвистического разнообразия. Большинство исследователей считают, что первые люди попали в Америку из северо-восточной Азии, вероятно, 25 000—12 000 лет назад, пройдя по узкой полоске суши, которая соединяла Сибирь и Аляску. Однако в различных частях Нового Света, например в Канаде и Перу, были найдены скелеты людей, возраст которых оказался значительно большим, чем предполагалось. Новый метод РД опроверг полученные результаты: все останки людей, до сих пор найденные в Америке, не датируются раньше 12 000 лет. Этот метод, вероятно, будет основным при определении возраста непосредственно останков человека, если таковые будут обнаружены в будущем.

Новый метод РД, по-видимому, будет также основополагающим при построении надежной хронологии неандертальского человека. Имеющиеся археологические данные указывают на довольно внезапное исчезновение этого антропологического вида неандертальцев в начале верхнего палеолита — примерно 35 000 лет назад. Хотя сейчас рано говорить об окончательных результатах, новый метод РД, вероятно, поможет установить, что периоды верхнего и среднего палеолита оказались «сжатыми» по причине ограничений, присущих обычному методу РД. Если это подтвердится, то окажется, что исчезновение неандертальского человека происходило в течение гораздо большего времени, чем предполагалось ранее.

Как головастики узнают родственников

Головастики лягушек *Rana cascadae* предпочитают жить вместе со своими «братьями» и «сестрами», которых они умеют отличать от неродственных особей. Способность узнавать родственников является, по-видимому, не результатом знакомства, а генетически обусловленным свойством

ЭНДРЮ Р. БЛОСТЕЙН, РИЧАРД К. О'ХАРА

ЖИВОТНЫМ многих видов свойственно образовывать социальные группы. Существуют стаи у птиц, косяки у рыб и стада у обезьян. Возникает вопрос: не лежат ли в основе таких групп (или хотя бы некоторых из них) семейные связи? Другими словами, способны ли животные узнавать родственников? Используют ли они эту способность для того, чтобы жить вместе с родней, а не с членами других семей и избегать скрещивания с близкими родственниками?

Проблема узнавания родственников занимала внимание многих исследователей поведения животных. В результате их работ стало очевидно, что для понимания явлений взаимодействия и альтруизма у животных необходим эволюционный подход. Но прежде чем вдаваться в теорию вопроса, следует выяснить, действительно ли животные того или иного рассматриваемого вида способны узнавать своих родственников. А если они обладают такой способностью, то как они это делают?

В течение нескольких последних лет мы изучали особенности поведения при узнавании родственников у головастика бесхвостых амфибий (жаб и лягушек), встречающихся в озерах и прудах северо-западной части Тихоокеанского побережья. Нам удалось показать, что эти головастики действительно узнают особей из одного с ними помета, причем у одного из изученных нами видов способность отличать «своего» от «чужака» выражена особенно ярко. Головастики лягушки *Rana cascadae* могут узнавать своих братьев и сестер, даже если до этого они не встречались с ними. Они предпочитают жить вместе с родственниками, а не с чужаками, и склонность так вести себя наблюдается на протяжении всего периода развития вплоть до превращения во взрослых лягушек, причем способ-

ность узнавать родню сохраняется и после метаморфоза.

СПОСОБНОСТЬ узнавать родню — непростое свойство. Оно тесно связано со способностью к взаимодействию и альтруистическому поведению, которые многие социальные животные проявляют преимущественно по отношению к своим родственникам. Классические примеры такого поведения дают нам общественные насекомые, например пчелы. Они живут высокоупорядоченными сообществами, состоящими из специализированных особей, для которых характерны взаимодействие и альтруизм. В таких сообществах неразмножающиеся особи (рабочие) обеспечивают жизнедеятельность одной размножающейся (матки), которая с генетической точки зрения является их сестрой. Почему же животные оказывают предпочтение своим родственникам, даже если такое поведение может дорого стоить отдельной особи?

Многое из того, что мы знаем сегодня об эволюции альтруизма ведет свое начало от работ У. Гамильтона (Оксфордский университет). Его теории, объясняющие альтруистическое поведение, постулируют, что особи взаимодействуют с близкими родственниками (или помогают им), а не с дальними родственниками или чужаками потому, что это дает им лучшие шансы в эволюции. Чем теснее родство между особями, тем больше у них одинаковых генов. Альтруист будет помогать родственникам, если даже такое поведение окажется опасным для него, поскольку, поступая так, он увеличивает вероятность того, что гены, подобные его собственным, будут переданы последующим поколениям.

Для обозначения репродуктивного успеха (успешного размножения), которого особь добивается за счет выживания и размножения близкого

родственника, Гамильтон предложил термин «совокупная приспособленность» (inclusive fitness). Если родственники живут поблизости друг от друга (возможно, вследствие того что расселение вокруг места рождения, вылупления из яйца или выклева выражено слабо), то специфическое узнавание родни не обязательно для того, чтобы происходило взаимодействие родственников особей. Если же взаимодействия с неродственными особями также вероятны, то умение узнавать «своих» помогает избежать ошибок в выборе объекта для помощи и гарантирует, что кооперация будет осуществлена с нужной особью, т. е. с близким родственником. Вообще говоря, особи, не способные правильно адресовать свои альтруистические действия, оставляют для будущих поколений меньше своих генов, чем животные, проявляющие альтруизм по отношению к родственникам. По этой причине естественный отбор будет способствовать выработке навыков узнавания одновременно с альтруизмом.

Существуют три основных поведенческих механизма, которые дают возможность особи узнавать родню. Во-первых, если социальные условия таковы, что родственники заведомо находятся вместе, то узнавание может развиваться путем обучения через знакомство. В этом случае члены одной семейной группы научаются узнавать друг друга в начале своей жизни. Во-вторых, может действовать механизм совпадения фенотипов: особь узнает и запоминает характерные признаки либо собственные, либо родственников. Такими признаками могут быть запах, цвет оперения или какие-то другие особенности. Животное отличает своих от чужаков, оценивая сходство и различие по этим признакам, которые оно помнит. Выбор по совпадению фенотипов в корне отличается от способа узнавания, основан-

ного на знакомстве, так как он позволяет узнавать «своих» в незнакомых прежде особях.

Третий механизм основан на действии особых «генов узнавания». С его помощью также возможно узнавание родственных, но незнакомых животных. Этот гипотетический механизм определения родства является чисто генетическим, в нем нет элемента обучения. Гены узнавания (или, точнее, аллели узнавания; аллелями называют альтернативные варианты одного и того же гена) определяют фенотипические признаки, например запах. Особи узнают и склонны предпочитать тех животных, которые несут такой же аллель, как они сами. Не следует забывать, что все эти меха-

низмы узнавания могут действовать и порознь, и совместно.

ПРОБЛЕМОЙ узнавания родственников мы занялись в нашей лаборатории в Университете шт. Орегон несколько лет назад главным образом из-за того, что располагали удобным объектом для экспериментов: первые же опыты с головастиками *R. cascadae* показали, что они идеально подходят для исследований такого рода. Нас особенно привлекли две особенности их образа жизни. Во-первых, головастики этого вида необычайно склонны жить группами, общинами. В то время как головастикам большинства других видов лягушек, насколько известно, не свойственно со-

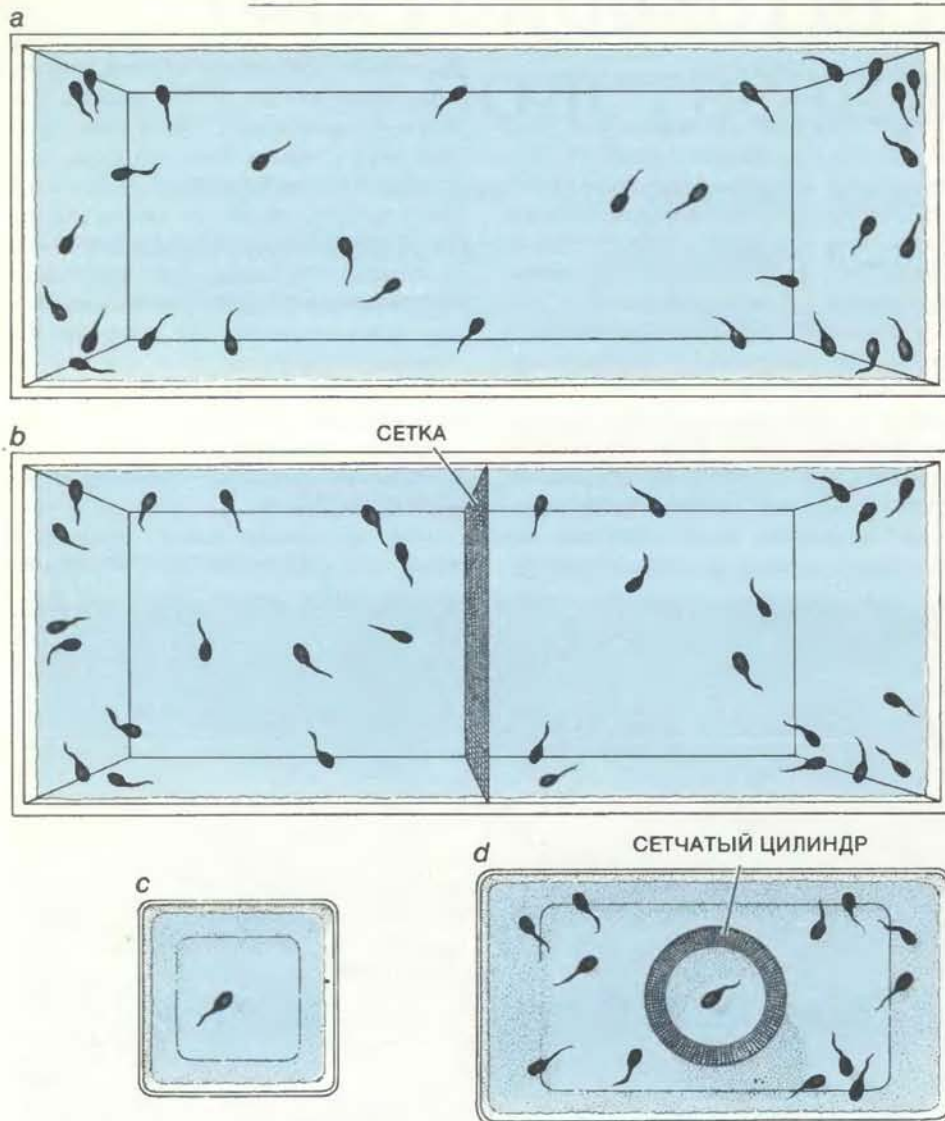
бираться в стайки, головастики *R. cascadae* образуют тесные скопления, включающие до 100 особей. Во-вторых, поскольку О'Хара ранее изучал образ жизни этих лягушек, мы знали, что головастики *R. cascadae* не расселяются далеко от места выклева. Следовательно, у особей из одного помета есть большие возможности для взаимодействия. Вполне вероятно, что скопления, которые мы наблюдали, состояли в основном из братьев и сестер. Мы предположили, что именно благодаря способности узнавать родственников головастики *R. cascadae* образуют и поддерживают такие стайки.

Для того чтобы понять природу и механизм узнавания родственников,



ГОЛОВАСТИКИ лягушки *R. cascadae*, обитающей в водоемах в районе Каскейд-Рейндж (шт. Орегон), образуют небольшие компактные скопления, или стайки. Эти головастики умеют отличать своих братьев и сестер от нерод-

ственных особей и предпочитают жить с родней. Такое поведение, которое проявляется и после превращения головастика в лягушку, приводит к тому, что стайки состоят в основном из особей одного помета.



ЧЕТЫРЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТА УСЛОВИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ головастиков, у которых затем изучалось узнавание родни. *a)* Эмбрионы, взятые из одной кладки икры, выращиваются совместно в одном аквариуме, так что головастики контактируют только со своими братьями и сестрами. *b)* Эмбрионы из двух разных кладок выращиваются в одном сосуде, но по разные стороны от сетчатой перегородки. Головастики могут обмениваться химическими и визуальными сигналами, и общение происходит как между родственными, так и между неродственными особями. *c)* Оплодотворенные икринки помещали по отдельности в непрозрачные чашки, так что каждый головастик вырастал в полном одиночестве. *d)* Оплодотворенную икринку помещали в сетчатый цилиндр, вокруг которого развивались 12 эмбрионов из другой кладки, так что находившийся внутри сетки головастик имел дело лишь с неродственными особями.

нужно было разработать схему опыта, в котором головастики имели бы возможность делать выбор между своими и чужими, которые им либо знакомы, либо незнакомы. При этом мы «держали в уме» три важных вопроса, которые обычно ставятся в начале любого исследования поведения животных. Как возник данный тип поведения? Какова его сенсорная основа? Каков его биологический смысл, т. е. в чем его адаптивное значение?

Мы начали с того, что собрали кладки (комки икры) лягушек *R. cascadae*, отложенные разными самками, оплодотворили ее спермой разных самцов и доставили в лаборато-

рию. (Одна кладка лягушки *R. cascadae* содержит 400—800 икринок; все головастики, выводящиеся из одной кладки, — это братья и сестры.) Мы также собрали «супружеские пары» лягушек и дали им возможность в условиях лаборатории отложить икру и оплодотворить ее. Эмбрионы были разделены на четыре группы, и особи разных групп развивались затем в разных условиях, после чего у головастиков изучали способность узнавать родственников.

В ПЕРВОЙ группе в одном аквариуме жили головастики только из одной кладки, т. е. особи общались лишь со своими братьями и сестрами.

Во второй группе в аквариум, разделенный посередине сетчатой перегородкой, помещали одинаковое число головастиков из двух разных кладок так, что особи разных пометов были разделены; но движение воды между половинами аквариума осуществлялось без помех, и все животные могли обмениваться как химическими, так и зрительными сигналами. Мы назвали этот вариант выращиванием в смешанном окружении, так как особи из двух разных пометов, по сути дела, росли вместе.

В третьей группе из кладки брали свежее оплодотворенные икринки и помещали каждую в индивидуальный непрозрачный сосуд, так что каждый головастик рос в полной изоляции от других особей. В четвертой группе мы клали одну свежее оплодотворенную икринку в сетчатый цилиндр, установленный в центре аквариума, и в тот же аквариум, но вне цилиндра помещали развивающихся эмбрионов из другой кладки. В таких условиях особь в цилиндре и химически и визуальным взаимодействовала только с неродственными животными. Итак, четыре разных варианта условий выращивания давали нам четыре различные по индивидуальному опыту группы головастиков: одни росли только вместе с братьями и сестрами, другие — с родственными и чужими особями, третьи развивались в полной изоляции и, наконец, четвертые — среди чужаков.

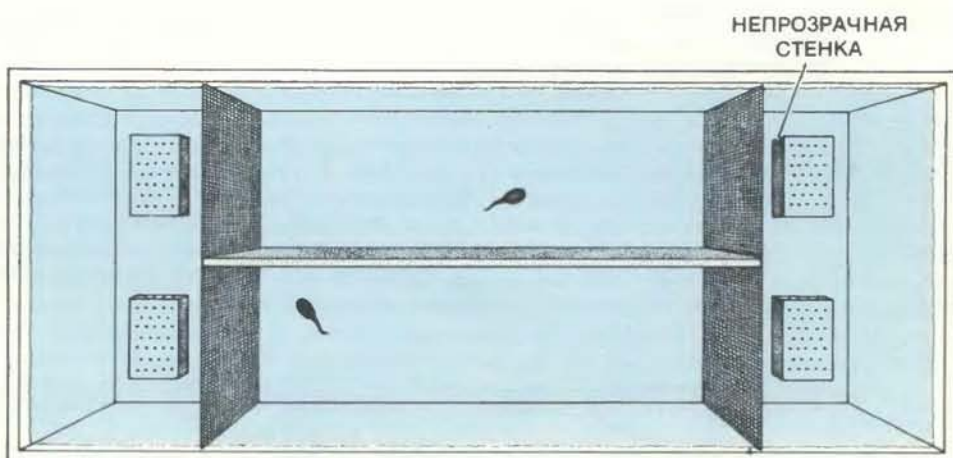
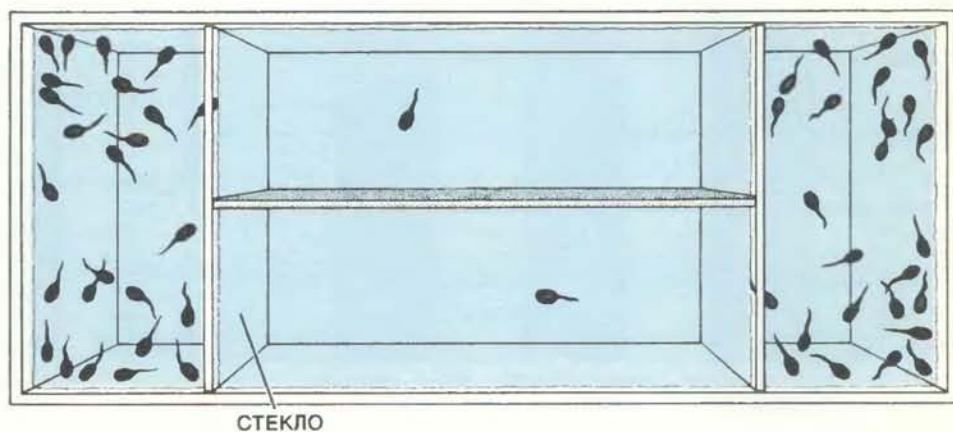
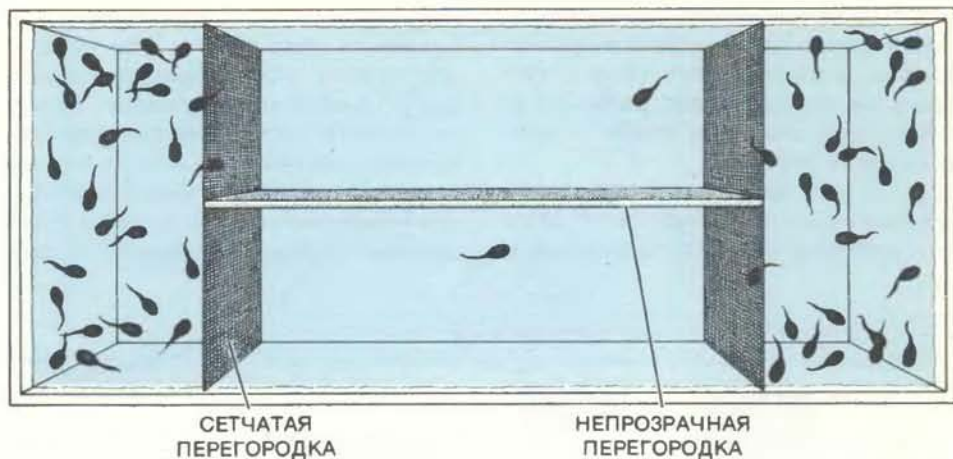
Для того чтобы выяснить, как условия выращивания сказываются на способности головастиков узнавать родственников, мы провели следующий опыт. Животным каждой из четырех групп предоставлялась возможность выбора между двумя группами головастиков, отличающимися друг от друга по степени родства и знакомства с изучаемыми особями. Обычно для опытов мы использовали прямоугольный сосуд, разделенный вдоль пополам водонепроницаемой непрозрачной перегородкой. Можно было одновременно, но независимо испытывать двух головастиков сразу, помещая их по разные стороны от перегородки. С торцов сосуда с помощью пластмассовой сетки выгораживались небольшие камеры, в которые помещали головастиков, игравших роль стимула (как правило, группа «стимул» состояла из 25 особей). Испытуемые животные могли их видеть, обмен химическими сигналами тоже был возможен, но тактильный контакт исключался. Повторяя опыт несколько раз, мы фиксировали время, в течение которого испытуемая особь находилась в части аквариума поблизости от определенной

группы-«стимула». Это время сравнивалось с ожидаемым для случайного передвижения особи, которое составляло бы 50% продолжительности опыта. Число головастиков, проводящих большую часть времени у одного из торцов аквариума, чем у другого, также учитывалось как дополнительный показатель их склонностей. В соответствующих контрольных опытах мы не обнаружили каких-либо методических недостатков ни в процедуре эксперимента, ни в оборудовании.

В первых же опытах было установлено, что головастики *R. cascadae* действительно могут отличать родственников от чужаков. Приблизительно 80% головастиков, выращенных среди братьев и сестер, проводили больше времени (статистически достоверно больше) поблизости от знакомых родственников, чем рядом с незнакомыми неродственными особями. Так вели себя и молодые головастики (на 11—19-й день после вылупления из икры), и головастики, находящиеся на поздних стадиях развития (в возрасте 34—40 дней).

НА СЛЕДУЮЩЕМ этапе исследования мы попытались выяснить, влияет ли знакомство с другими головастиками на поведение, связанное с узнаванием родни. Такие данные позволили бы судить о становлении этого типа поведения у изучаемого нами вида и могли дать ключ к управляющему им механизму. Были взяты три группы головастиков: одних выращивали в смешанном окружении, других — в обществе только чужаков и третьих — в полном одиночестве. Животные находились в соответствующих условиях в среднем по четыре недели (от момента вылупления из икры), после чего им предоставлялась возможность сделать выбор между группой незнакомых им, но родственных особей, и группой незнакомых и неродственных головастиков.

Мы установили, что точно так же, как головастики, выращенные только вместе с братьями и сестрами, головастики, развивавшиеся в смешанном окружении, проводили больше времени вблизи родственников, чем вблизи чужаков. В этой серии опытов был обнаружен очень важный факт: оказалось, что головастики могут отличать родственных особей от неродственных, даже когда и те и другие им незнакомы. Опыты с головастиками, выращенными в окружении только неродственных особей, дали тот же результат: они предпочитали незнакомых родственников незнакомым чужакам. Следовательно, контакты с неродственными головастиками в хо-



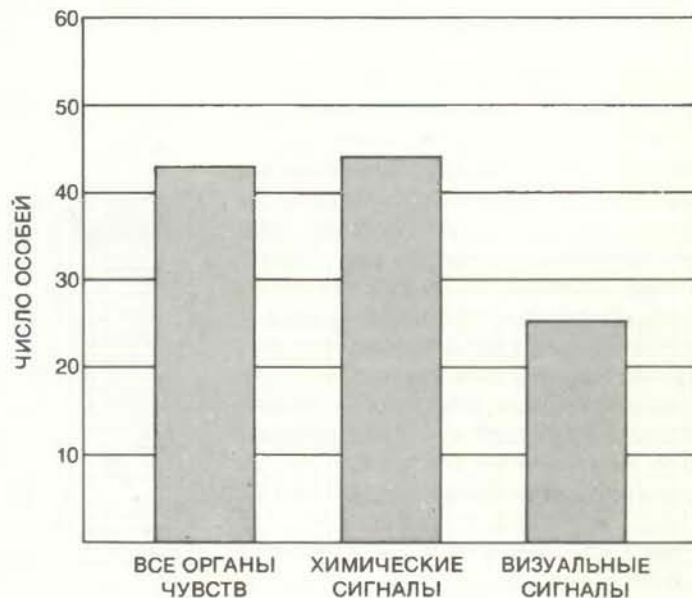
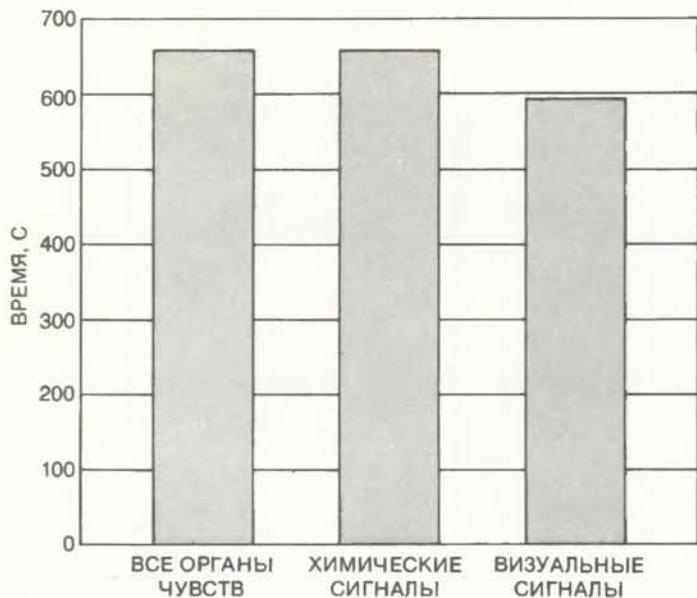
ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВЫБОРУ у головастиков (вверху) проводился в продолговатом аквариуме длиной 1,2 м, разделенном вдоль пополам водонепроницаемой непрозрачной перегородкой, так что одновременно можно было ставить опыт с двумя головастиками. У торцов сосуда сетчатыми перегородками были отделены камеры, в каждую из которых помещали группу из 25 головастиков, служившую стимулом; с одной стороны находились особи из того же помета, что и испытуемый головастик, а с другой — неродственные ему особи. Регистрировалось время, которое испытываемая особь проводила около каждой из двух групп-«стимулов». Большинство головастиков, независимо от условий выращивания (см. рисунок на с. 74) предпочитали плавать поблизости от родной группы. Для выяснения сенсорной основы узнавания родни установку модифицировали. В одном эксперименте (в середине) сетки заменяли водонепроницаемыми стеклянными перегородками, так что испытываемые головастики видели животных в боковых отсеках, но не могли обмениваться с ними химическими сигналами. В этих условиях предпочтение к родне не проявлялось. В другом эксперименте (внизу) группы-«стимулы» помещали в коробки, у которых стенка, направленная в сторону испытываемых животных, была непрозрачной, а остальные стенки имели отверстия. Испытуемые головастики не видели животных, находящихся в коробках, но могли воспринимать от них химические сигналы. В таких условиях головастики проявляли склонность к своим братьям и сестрам. По-видимому, в основе узнавания родни лежит ольфакторная коммуникация.

де развития не сказываются на склонности держаться вместе с родственниками, а контакт с братьями и сестрами на ранней стадии развития не обязателен для того, чтобы в дальнейшем их узнавать.

А как вели себя головастики, выращенные в полном одиночестве? До испытаний они никогда не взаимодей-

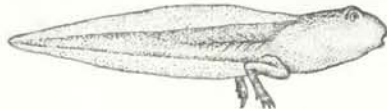
вовали с другими головастиками и не видели их даже издали. Мы обнаружили, что и такие животные проводят большую часть времени, плавая поблизости от своих братьев и сестер. Видимо, для развития поведения, связанного с узнаванием родственников, не нужно никакого опыта контактов с другими особями. Поскольку голова-

стики *R. cascadae* могут узнавать родственников им особей, с которыми они не контактировали с тех пор, как, будучи еще эмбрионами, находились в составе одной кладки, мы сделали вывод, что знакомство не может быть главным механизмом узнавания родственников у этого вида. Должно быть, главную роль играет сходство



РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, изображенных на предыдущей иллюстрации. На диаграмме слева по вертикальной шкале отложено среднее время, в течение которого испытываемые головастики плавали в той части аквариума, которая примыкала к отсеку с родственными животными. Левый столбик соответствует условиям верхнего рисунка на с. 75, в которых головастики могли использовать все органы чувств. Правый столбик представляет данные, когда головастики могли руководствоваться лишь зрением, а средний — химическими сигналами. Общая продолжительность опыта — 1200 с (20 мин), т. е. 600 с, проведенные в любой из двух частей сосуда, соответствует случайному

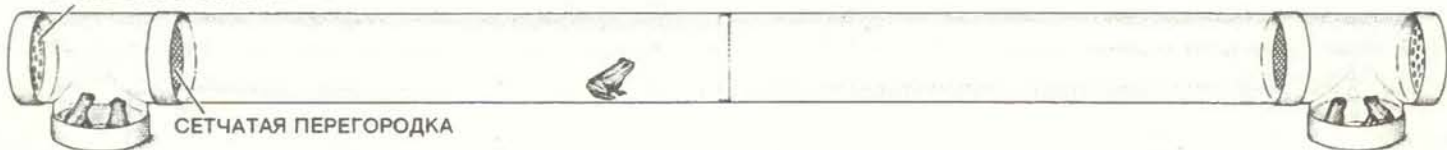
поведению. Когда головастикам приходилось полагаться только на визуальные сигналы, время, проводимое рядом с родственниками, не отличалось от среднестатистического. В двух других случаях среднее время составляло 660 с. В каждом эксперименте испытывалось 60 животных. Другим критерием предпочтения родственников было число животных, которые проводили поблизости от них большую часть времени (справа). В условиях, когда головастики могли пользоваться всеми органами чувств или только химическими сигналами, около 75% особей проводило большую часть времени у группы родственников.



РАЗВИТИЕ ГОЛОВАСТИКА в лягушку занимает от 6 до 8 с лишним недель. На рисунке показаны четыре стадии этого процесса (всего их 26). Возраст, в котором головастик достигает определенной стадии развития, может сильно

варьировать. Способность узнавать родственников проявляется у *R. cascadae* на всех этих четырех стадиях, в том числе и после метаморфоза — у лягушат.

КРЫШКА С ОТВЕРСТИЯМИ



СЕТЧАТАЯ ПЕРЕГОРОДКА

СОХРАНЯЕТСЯ ЛИ СПОСОБНОСТЬ узнавать родню после метаморфоза? На этом рисунке показано приспособление, в котором проверялось, могут ли лягушата отличать своих родственников. В один из боковых отсеков прозрачной пластиковой трубки помещали братьев и сестер испытуемого лягушонка, а в другой — неродственных ему особей.

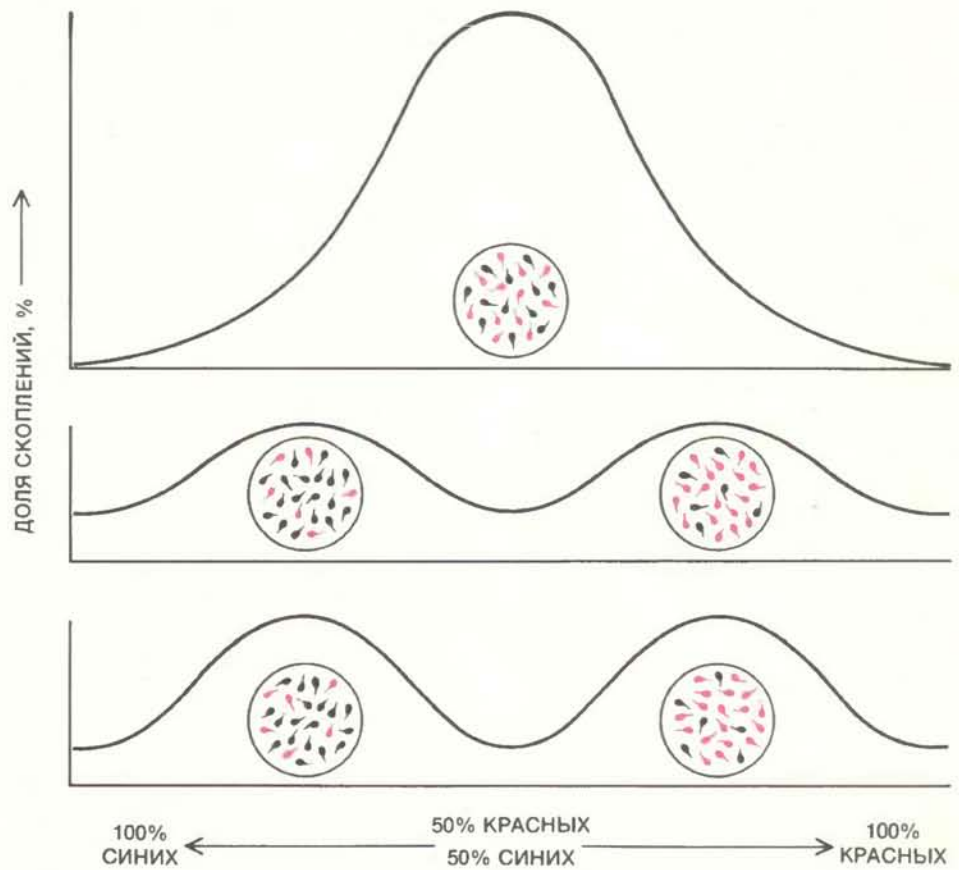
Предпочтение определяли по времени, которое лягушонок проводил поблизости от отсека с родней по сравнению со временем, которое он проводил вблизи чужих ему лягушек. Такие опыты показали, что у *R. cascadae* и после метаморфоза сохраняется способность узнавать родню.

фенотипов или действие генов узнавания, или же и то и другое вместе.

О природе механизмов, лежащих в основе системы узнавания, можно судить по степени ее чувствительности. Высокая чувствительность системы предполагает, что важную роль играет генетический компонент. Насколько же чувствительна система узнавания у *R. cascadae*? Для ответа на этот вопрос мы решили выяснить, могут ли головастики отличать родных братьев и сестер от сводных и последних — от совершенно неродственных особей. Мы получили сводных братьев и сестер по отцовской линии, оплодотворив отдельно икру двух самок спермой одного самца, и по материнской — оплодотворив половину кладки спермой одного самца, а половину — другого.

Обнаружилось, что головастики, выращенные в изоляции, предпочитают родных братьев и сестер сводным по отцовской или материнской линии. Сводным братьям и сестрам по материнской линии оказывалось предпочтение по сравнению со сводными родственниками по отцовской линии и совершенно неродственными особями, то предпочтение было в пользу первых. По-видимому, для отличия родни от неродни достаточно одних отцовских или одних материнских признаков. Но головастики *R. cascadae* могут также различать родню разной степени родства, т. е. обладают высокочувствительной системой узнавания родственников. Из того факта, что в опытах головастики предпочитали сводных братьев и сестер по материнской линии особям такой же степени родства по отцовской линии, следует, что материнские свойства сильнее влияют на узнавание. Возможно, это связано с тем, что развивающийся эмбрион получает от матери больше, чем от отца. Например, в икринках есть определенные цитоплазматические факторы. А вклад отца — в основном генетическая информация. Поскольку головастики *R. cascadae* отличаются сводных родственников по отцовской линии от неродни, можно думать, что способность к узнаванию у этого вида по меньшей мере частично обусловлена каким-то генетическим фактором.

КАКОВА может быть роль системы узнавания родственников (оставим пока в стороне ее высокую чувствительность) в жизни головастика *R. cascadae*? Наиболее очевидным кажется предположение, что с ее помощью формируются небольшие,

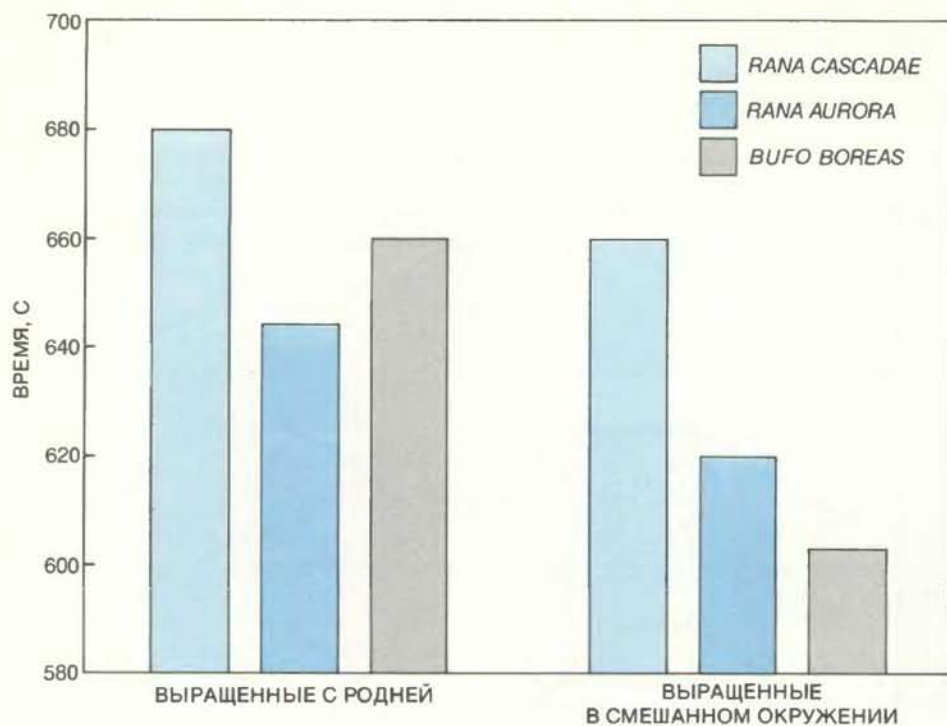


ВЫБОР СТАЙКИ головастики *R. cascadae* изучали также в природных условиях. Животных поместили красной и синей краской и выпустили их в водоем. Затем определяли «цветовой состав» скоплений, которые они там формировали. В контрольном водоеме все головастики были из одной кладки, половину их поместили красным цветом, а половину — синим. Результаты этих контрольных опытов представлены *вверху*: получилась колоколообразная кривая, т. е. в большинстве стаяк особи разного цвета встречались примерно в равном числе, а значит, цвет сам по себе не влиял на формирование скоплений. Когда же особей из одной кладки покрасили синим цветом, из другой — красным и выпустили вместе в один водоем, оказалось, что цветовой состав стаяк, образуемых этими головастиками, описывается «бимодальным» распределением. Причем не имело значения, выращивали ли особей одного помета порознь (*средняя кривая*) или вместе (*нижняя кривая*). Большинство скоплений включало либо в основном «красных», либо преимущественно «синих» головастика. Иными словами, большинство стаяк состояло из родственных между собой особей.

плотные по структуре стайки. Жизнь в составе стаи дает некоторые преимущества по сравнению с существованием в одиночку. Возрастает способность успешно прокормиться, так как появляется возможность делиться найденной пищей. Легче становится избегать хищников, вовремя обнаруживать их и уклоняться от нападения. В нашей лаборатории недавно получены данные, из которых следует, что при атаке со стороны хищных насекомых головастики выделяют особые вещества, побуждающие к бегству других членов группы. Мы считаем, что функция системы узнавания родственников у головастика *R. cascadae* заключается в первую очередь в том, что она обеспечивает формирование групп сходных особей, что, возмож-

но, способствует улучшению их питания, а главное — позволяет спастись от хищников. Конечно, головастики могут получать выгоду, кооперируясь и с неродственными особями. Но помогая родственникам в поисках корма или избегании опасности, они способствуют выживанию особей, несущих такие же, как у них, гены, и тем самым увеличивают свою совокупную приспособленность.

В ОПЫТАХ, о которых шла речь выше, головастики имели возможность пользоваться всеми органами чувств. Для того чтобы разобраться, какие из них играют ведущую роль в узнавании родственников, мы поставили иную серию экспериментов. Вначале мы исследовали роль



РАЗНЫЕ ВИДЫ характеризуются разным поведением, связанным с узнаванием родственников. У головастиков двух видов лягушек и одного вида жаб проверялось узнавание родни в условиях, изображенных на с. 75 вверху. Для всех трех видов наблюдалось образование скоплений из родственных особей, если головастики выращивались только вместе со своими братьями и сестрами: животные проводили больше времени (среднестатистическое значение — 600 с) в той части аквариума, которая была ближе к отсеку с их родственниками. Но у *R. cascadae* и жабы *Bufo boreas* головастики так вели себя на всех стадиях развития, а у *Rana aurora* — только на ранних стадиях. Если же головастиков выращивали в смешанном окружении, то время, которое они проводили рядом с родственниками, падало до среднестатистического значения в случае *R. aurora* и *B. boreas*, а у *R. cascadae* склонность предпочитать родню сохранялась.

слуха. При помощи гидрофона, связанного с осциллографом, регистрирующим звуки частотой от 10 Гц (эта величина — нижняя граница диапазона частот, воспринимаемых животными) до 100 тыс. Гц, мы «выслушивали» отдельных головастиков. В этом диапазоне никаких звуков головастики не издавали.

Далее мы попытались выяснить, не используют ли головастики в общении друг с другом какие-либо зрительные или химические сигналы. опыты ставились несколько иначе, чем описано выше. В одном из экспериментов животных, служивших стимулом, помещали за водонепроницаемой стеклянной перегородкой (вместо пластмассовой решетки), так что они и испытуемые животные видели друг друга, но не могли общаться с помощью химических сигналов. В другом эксперименте «стимул» находился в камере с непрозрачной передней (направленной в сторону испытуемых головастиков) стенкой, но с отверстиями по бокам и сверху. Эти камеры ставились за пластмассовыми решетками в торцевых частях аквариума. В таких условиях ничто не пре-

пятствовало животным обмениваться химическими веществами, но зрительный контакт был исключен. Оказалось, что испытуемые головастики не могут отличить родственников только по внешнему виду, но одних химических сигналов вполне достаточно. Ясно, что у головастиков *R. cascadae* главную роль в узнавании играет хеморецепция. Они посылают сигнал химической природы, присутствующий только родственникам между собой особям, который воспринимается с помощью обоняния, вкуса или еще каким-то подобным образом, и таким путем головастики отличают своих от чужих.

НАС интересовало также, сказываются ли на поведении, связанном с узнаванием, глубокие изменения в анатомии, физиологии, экологии и поведении, сопутствующие метаморфозу, в результате которого головастики превращаются в лягушек. Головастики живут только в воде, дышат преимущественно жабрами и всеядны, а взрослые лягушки ведут полуводный—полуназемный образ жизни, дышат легкими и являются

хищниками. Чтобы подойти к решению этой проблемы, нам пришлось в лаборатории содержать сотни лягушат, что оказалось весьма трудоемким и хлопотным делом. У лягушек, развившихся из головастиков, выращенных в различных (описанных выше) условиях, в возрасте 4—12 дней после метаморфоза и еще раз в возрасте 39—47 дней проверяли способность узнавать родственников. Методика экспериментов была в принципе та же, что и в опытах с головастиками, но использовалось при этом другое устройство, подходящее для работы с лягушками. Испытуемую особь помещали в увлажненную прозрачную пластмассовую трубку, в которой ближе к концам имелись перегородки. В отсеках трубки за перегородками находились животные, служившие стимулом. В один из боковых отсеков помещали братьев или сестер испытуемого лягушонка, а в другой — неродственных ему особей. Определяли время, которое данное животное проводило в части трубки, ближней к отсеку с его родственниками, и сопоставляли со временем, которое оно проводило поблизости от чужих ему лягушек. Полученные результаты свидетельствуют о том, что способность узнавать родню явно сохраняется, несмотря на большие анатомические и физиологические изменения, произошедшие при метаморфозе.

Если принять во внимание, что скопления взрослых особей у *R. cascadae* неизвестны, возникает вопрос, какие преимущества дает способность узнавать родню этим лягушкам после метаморфоза? Возможно, взрослым лягушкам такая способность и не дает никаких адаптивных преимуществ, а сохраняется после метаморфоза просто в силу того, что естественный отбор не противодействует ее сохранению. Не исключено, однако, что жизнь взрослых особей *R. cascadae* как-то зависит от способности узнавать родственников, которая может быть важной при размножении (так как помогает избежать скрещивания с близкими родственниками) или же в социальной организации (например, при поисках родного пруда, куда нужно вернуться).

Конечно, опыты в лаборатории есть лишь некое приближение и упрощение тех сложных внешних, в том числе социальных условий, с которыми сталкиваются животные в природе. Понимая это, мы в течение трех летних сезонов подряд вели исследования в озерах и прудах, населенных головастиками *R. cascadae*. Головастики для полевых опытов мы получали, собирая кладки в естественных

местах размножения и выращивая молодь в лаборатории либо с особями того же помета, либо в смешанном окружении. Головастиков этих двух групп метили разным цветом, погружая их в безвредную красную или синюю краску. Затем мы перемешивали особей из двух разных групп и выпускали их в естественные водоемы в районе Каскейд-Рейндж, где обитают лягушки *R. cascadae*. Учитывая, что такие головастики могли образовывать группы, руководствуясь своим новым цветом, а не степенью родства, мы для контроля сделали следующее. Некоторые группы родственных особей разделили пополам, покрасили половину животных красной краской, а половину — синей и выпустили этих животных в контрольные водоемы.

Совсем не просто подобраться к скопленю головастиков и поймать их. Как только головастики замечали приближение человека, они быстро «разбегались». И тем не менее нам удалось получить вполне определенные данные. Мы установили, что в контрольных водоемах соотношение «красных» и «синих» особей в скоплениях, которые образовали головастики-родственники, было случайным. В 103 изученных нами скоплениях цвет особей никак не отразился в составе стайки. Напротив, распределение «красных» и «синих» головастиков из групп, различающихся по родству, было отнюдь не случайным. Мы изучили 353 скопления в опытных водоемах, и в каждой стайке преобладали особи какого-то одного цвета. Результаты полевых исследований привели нас к выводу, что не только в лаборатории, но и в природе головастики *R. cascadae* могут узнавать своих братьев и сестер и предпочитают жить с ними, а не с неродственными особями.

В НАЧАЛЕ наших исследований было сделано предположение, что некоторые особенности поведения, которые мы отметили у головастиков *R. cascadae*, могут быть связаны с работой системы активного узнавания родни. Показав, что это действительно так, мы решили изучить другие виды бесхвостых амфибий, для которых характерны иные особенности поведения.

Красноногая лягушка (*Rana aurora*) состоит в близком родстве с *R. cascadae*. Однако когда мы исследовали поведение особей этого вида в стандартной ситуации выбора, то получились совсем не похожие результаты. Головастики красноногой лягушки способны отличать своих родственников лишь на ранних стадиях развития

(свободноплавающих головастиков) и то только, если их выращивали вместе с братьями и сестрами. По мере развития они эту способность утрачивают. Головастики западной жабы (*Bufo boreas*) узнают особей из одного с ними помета на всех стадиях развития, вплоть до метаморфоза, но только если они при этом не контактировали с чужаками. Если же они встречались с неродственными головастиками, то быстро утрачивали способность узнавать свою родню.

Результаты, которые мы получили в опытах с *Bufo boreas*, сходны с данными Б. Уолдмана из Корнеллского университета. Он изучал головастиков близкого вида — американской жабы (*Bufo americanus*) и обнаружил, что в лабораторных условиях они в общем-то не могут различать родственных и неродственных особей, если выращивались в смешанном окружении. Похоже, что у обоих видов жаб, а также, по-видимому, и у красноногой лягушки знакомство сказывается на способности отличать родню.

Собственно, неудивительно, что головастики красноногой лягушки и западной жабы не обладают выраженной способностью узнавать родню. Головастики и того и другого вида вскоре после появления на свет уплывают от места кладки. Более того, известно, что головастики красноногой лягушки не образуют скоплений, а головастики западной жабы, напротив, обычно собираются в многочисленные стаи (включающие до миллиона особей), в состав которых входят особи из сотен разных кладок. Видимо, у головастиков этих видов не так уж много шансов взаимодействовать со своими братьями и сестрами в ходе развития, так что у них и не развилась чувствительная система опознавания родни, которая делает возможным формирование тесных групп родственных особей.

ЕСЛИ проанализировать все имеющиеся данные об узнавании родни у разных видов животных, то можно усмотреть некоторые закономерности. Животные, постоянно живущие в воде, такие, как рыбы или головастики, пользуются ольфакторными сигналами: они выделяют в воду специфические химические вещества. Птицам свойственны как генетически закрепленные сигнальные признаки, например окраска оперения, так и другие сигналы, скажем акустические (пение). У большинства видов насекомых и млекопитающих в основе узнавания родни лежит обоняние. Сейчас уже ясно, что из трех механизмов узнавания родни чаще всего используется знакомство. Этот механизм эффек-

тивен, если вероятность того, что взаимодействующие особи данного вида являются родственниками, велика. У западной жабы, как мы установили, знакомство влияет на способность узнавать родню. Оно явно играет какую-то роль в узнавании родственников у большинства птиц и мелких млекопитающих, изучавшихся в этом отношении. Вероятно, у многих видов знакомство служит одним из важных способов исключения инбридинга.

Мы уверены в том, что знакомство несущественно в механизме узнавания родни у головастиков *R. cascadae*, но остается неясным, в чем, собственно, этот механизм состоит — происходит ли узнавание по фенотипу или же действуют «гены узнавания». Здесь трудно провести границу, хотя известно несколько случаев, когда несомненно, что сходство фенотипов играет главную роль. Так, Г. Бакл и Л. Гринберг из Канзасского университета показали, что пчелы-галиты *Lasioglossum zephyrum*, защищающие вход в гнездо, умеют различать среди незнакомых особей родственников и неродственников по степени сходства их фенотипов с фенотипом особей, вместе с которыми они выросли. Стражи знают запах пчел, живущих с ними в одном гнезде, и пропускают в него только тех незнакомых особей, которые пахнут так же. В экспериментах Р. Портера (Университет Вандербильта) особи каирской мыши (*Acomys cahirinus*), которых искусственно «надушили», предпочитали быть вместе с теми незнакомыми особями, которым придали тот же запах.

Сложнее выявить случаи, когда узнавание определяется действием генетических механизмов. Недавно было проведено исследование принципов выбора полового партнера у домовых мышей (*Mus musculus*); его результаты со всей очевидностью говорят о генетической основе системы узнавания (см. Бичем Г., Ямадзаки К., Бойз Э. Распознавание генетической индивидуальности с помощью обоняния, «В мире науки», 1985, № 9). Из этой работы следует, что среди потенциальных партнеров для спаривания домовая мышь способна различать особей, отличающихся всего по одному гену главного комплекса гистосовместимости (H-2). Этот комплекс генов обеспечивает синтез антигенов, обуславливающих отличие клеток данного организма от чужеродных. Самцы домовых мышей предпочитают спариваться с самками, имеющими иной тип H-2 по сравнению с их собственным, причем фактором, от которого зависит выбор, является генетически

обусловленный запах животного, специфика которого определяется аллелем H-2.

Чувствительная система узнавания родни у головастиков лягушки *R. cascadae* также может иметь генетическую основу. Впрочем, вполне возможен и такой путь: головастик, даже выращенный в полном одиночестве, путем «самообразования» приобретает способность узнавать свой собственный, генетически детерминированный запах и затем сопоставляет с ним запахи незнакомых ему особей. В ситуации выбора между двумя группами головастиков он предпочтет особей, обладающих более «родным» запахом, считая их своими родственниками.

Не исключено, что вообще невозможно установить экспериментально, какой из механизмов лежит в основе узнавания у головастиков *R. cascadae* — играет ли роль сходство фенотипов или действует врожденная генетическая система. Вероятнее всего, одновременно используются оба.

На самом деле есть мнение, что разница между этими двумя механизмами незначительная. И тот и другой позволяют животному узнавать в незнакомой особи родственника, так что последствия для эволюции в обоих случаях одинаковы.

Помимо теоретического приложения — объяснения явления альтруизма между родственными особями — понимание основ узнавания родни может быть использовано для решения практических задач. Сведения о том, как особи одного вида узнают друг друга, очень важны для разведения животных и для размножения некоторых исчезающих видов, особенно в тех случаях, когда знакомство с потенциальным партнером сказывается на поведении при спаривании. А вскрытая недавно взаимосвязь между системой узнавания родственников и генами гистосовместимости обещает нам и совсем иную выгоду: результаты изучения поведения при узнавании родственников могут пролить свет на механизмы иммунной системы.

Наука и общество

Эти «нежные» осадки

СОГЛАСНО данным Геологической службы США, строительство плотин для гидроэлектростанций, в ирригационных целях и в целях регулирования стока привело к значительному уменьшению количества осадков, выносимых в океан главными реками США. Плотины препятствуют переносу осадков речным потоком. Можно полагать, что в большинстве случаев такое явление приводит к нежелательным последствиям. Например, в дельте Миссисипи берега быстро отступают, так как океанские волны и приливы легко смывают уменьшившиеся в объеме осадки, которые накапливаются рекой. Ниже плотин реки обладают большей способностью к переносу твердых частиц и поэтому сильнее размывают русло.

Р. Мед и Р. Паркер из Геологической службы обсуждают эти явления в статье, представленной во второй части ежегодника "National Water Summary". Они сообщают, что в настоящее время Миссисипи приносит в Мексиканский залив вдвое меньше осадков, чем 35 лет назад. За последние десятилетия вынос осадков в Мек-

сиканский залив рекой Рио-Гранде снизился с 20 млн. т в год до 1 млн. После того как в 1935 г. на реке Колорадо начало заполняться водохранилище у плотины Гувера, количество осадков, выносимых рекой в Калифорнийский залив, уменьшилось со 150 млн. т в год до 100 тыс.

Значение полученных данных обсуждает и Ф. Кохен, главный гидролог Геологической службы. «Хотя некоторые реки стали переносить меньше осадков, — говорит он, — это не означает, что мы можем ослабить контроль за эрозией почв. Количество осадков, поставляемых в океан реками, составляет только 10% от общей массы почвы, подвергающейся эрозии». Следовательно, 90% земли не смывается непосредственно в реки и не выносится в океан. Эта почва накапливается где-то между областями эрозии и морем, главным образом на склонах холмов, за плотинами, в речных долинах и поймах. «Влияние этого «складирования» осадков на проблему чистоты воды имеет исключительно важное значение. Многие из токсичных веществ, переносимых реками, аккумулируются осадочными частицами и прочно связываются с ними, поэтому для точного предска-

Издательство
МИР
предлагает:

И. Стюарт
ТАЙНА КАТАСТРОФЫ
Перевод с французского

Данная книга посвящена изложению основных положений и практических применений теории катастроф в занимательной форме при помощи многочисленных забавных иллюстраций.

Для специалистов, работающих в различных областях науки и техники и в народном хозяйстве, а также для студентов вузов.

1986, 11 л. Цена 80 к.



зания перемещения этих веществ необходимо понимать, что происходит с осадками».

Во чреве

НЕКОТОРЫЕ бактерии, включая возбудителей брюшного тифа и туберкулеза, обладают способностью проникать в животные клетки и существовать внутри них. Жизнь же других патогенных бактерий проходит вне клеток зараженного организма. Недавно Р. Исбергу и С. Фалькоу из Медицинского центра Станфордского университета удалось выделить ген, ответственный за способность бактерии проникать в клетку. Сообщение об этом опубликовано в журнале «Nature». Расшифровав механизм работы таких генов, мы, возможно, найдем пути к созданию новых лекарственных средств, отличных от антибиотиков, для борьбы с проникающими бактериями.

Исследователи изучали взаимодействие с животной клеткой *Yersinia pseudotuberculosis* и *Escherichia coli*. *Y. pseudotuberculosis*, попав в организм с пищей, проникает в клетки, выстилающие кишечник. Этот микроорганизм вызывает чуму морских свинок — заболевание, напоминающее брюшной тиф. *E. coli* же не спо-

способны проникать в клетки. У человека и других млекопитающих *E. coli* в норме живут в кишечнике, не причиняя никакого вреда.

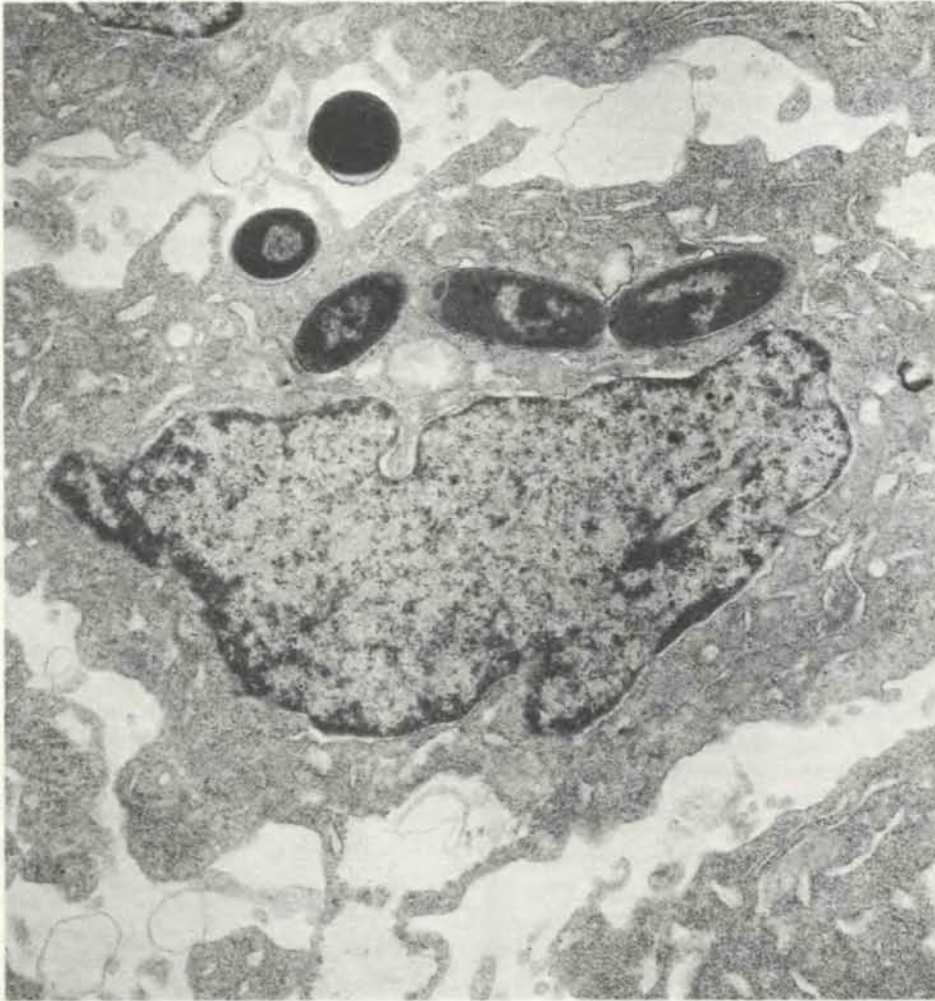
Исберг и Фалькоу предположили, что способность проникать в клетку закодирована в небольшом участке генетического материала *Y. pseudotuberculosis*, который можно перенести в другую бактерию. Для того чтобы найти этот участок, они расщепили ДНК *Yersinia* на короткие фрагменты, встроили эти фрагменты в ДНК фага λ (фаги — это вирусы бактерий) и каждый клонировали в клетках *E. coli*, получив таким образом «библиотеку» генома *Y. pseudotuberculosis*.

Бактерии *E. coli*, зараженные фагом λ , наносили на монослой клеток HEp-2 (лабораторная линия культивируемых клеток, полученных из легочной карциномы человека), состоящий приблизительно из 10 млн. клеток, и инкубировали в течение 3 ч, по-

сле чего слой клеток несколько раз промывали. Те клетки *E. coli*, которые оставались в слое после многократного промывания, должны были быть каким-то образом связаны с клетками HEp-2. Клетки *E. coli*, оставшиеся после промывания, клонировали, т. е. из каждой отдельной клетки выращивали колонию; все клетки такой колонии идентичны. Затем клетки из каждой колонии опять инкубировали с клетками HEp-2, но на этот раз в присутствии антибиотика гентамицина, который не проникает в клетки. После такой процедуры могли выжить только те бактерии, которые попали *внутри* клеток HEp-2. В результате было отобрано 12 клонов *E. coli*. При электронномикроскопическом исследовании клеток HEp-2 внутри них действительно обнаружались клетки *E. coli*. (Однако, приобретая способность проникать в животные клетки, бактерии *E. coli* не становятся болезнетворными.)

Выяснилось, что участок генетического материала *Y. pseudotuberculosis*, который придавал клеткам *E. coli* способность проникать в животные клетки, представляет собой сегмент ДНК длиной не более 3200 оснований. Исберг и Фалькоу назвали его locus *inv*. В нем содержится единственный ген, в котором закодирована структура одного большого белка молекулярной массой 108 тыс. дальтон. Таким образом, по крайней мере у *Y. pseudotuberculosis*, генетическая основа, казалось бы, сложного свойства, на удивление проста: оно обеспечивается очень малым количеством генетического материала.

Исберг и Фалькоу считают, что их работа — «первый шаг на пути к выявлению ранее неизвестного класса белков, закодированных в геноме у многих «проникающих» болезнетворных микроорганизмов и являющихся частью механизма их патогенности». Остается, однако, еще выяснить, в чем конкретно заключается функция белка, придающего бактерии такие свойства. Когда это станет известно, можно будет, с одной стороны, создавать средства, препятствующие проникновению болезнетворных бактерий в клетку. С другой стороны, превратив безвредных бактерий в проникающие, их можно использовать в качестве «почталюнов», переносящих белки или ДНК в животные клетки, что важно как для исследовательских, так и для медицинских целей.



БАКТЕРИИ *Escherichia coli*, в которые с помощью фага λ внесен ген *inv* из болезнетворных бактерий *Yersinia pseudotuberculosis*, приобрели способность проникать в животные клетки, в норме им не свойственную. Здесь представлена электронная микрофотография клетки из культуры легочной карциномы человека с клетками *E. coli* внутри нее (пять темных округлых тел в верхней части снимка); длина клетки *E. coli* 2 мкм.

Куда скользит Земля?

НА ПРОТЯЖЕНИИ миллионов лет мощный внешний слой нашей планеты перемещался относительно ее центра. Доказательства, подтверждающие это предположение, были представлены в журнал "Journal of Geophysical Research" Дж. Эндрюс из Геологической обсерватории Ламонт-Доэрти Колумбийского университета. Данные Эндрюс, сами по себе поразительные, дают ответ и на загадочный вопрос о миграции земных полюсов. Давно известно, что геомагнитные полюсы кажутся перемещающимися по земной поверхности. Свидетельства этого кажущегося движения были накоплены при изучении остаточной намагниченности определенных пород: если возраст и исходное положение такой породы известны, то можно восстановить направление, которое силовые линии магнитного поля Земли имели во время формирования породы, и определить древнее относительное положение полюса.

Первоначально считалось, что изменения положений магнитных полюсов в прошлом обусловлены неустойчивостью геомагнитного поля, которая приводит к смещению магнитных полюсов относительно фиксированных географических полюсов (их местоположение определяется осью вращения Земли). Однако скоро стало ясно, что в рамках существующей теории земного магнетизма перемещения палеомагнитных полюсов оказываются недопустимо большими. Кроме того, рассчитанные траектории мигрирующих полюсов зависели от того, на каком континенте были собраны данные.

Некоторое время казалось, что эти расхождения объясняются теорией тектоники плит: при дрейфе континентов, впаивных в крупные плиты твердого внешнего слоя Земли — литосферы, точки, в которых сейчас проводятся геомагнитные измерения, меняли свое положение. Можно было полагать, что «завышенные» расстояния между палеомагнитными и современными географическими полюса-

ми есть результат как движения плит, так и неустойчивости геомагнитного поля. Тем не менее расчеты, проведенные с учетом этих двух факторов, не объяснили значительное смещение полюсов.

Поскольку геомагнитные полюсы связаны с географическими, они не могут абсолютно свободно мигрировать по земной поверхности. Эндрюс привела доводы в пользу того, что скользить должна вся поверхность Земли: большая часть мощной пластической мантии Земли, которая подстилает литосферу, должна смещаться относительно центра Земли, перенося на себе всю литосферу. Такое крупномасштабное перемещение мантии и литосферы вместе с относительным движением литосферных плит и блужданием геомагнитного полюса могут полностью объяснить миграцию полюсов.

Для доказательства этой гипотезы Эндрюс должна была найти хорошо определяемые точки в мантии, которые позволяют измерить любое изменение их положения по отношению к

«среднему» положению палеомагнитного полюса, скорректированному с учетом случайных вариаций геомагнитного поля. Такие точки существуют. Это так называемые горячие точки — фиксированные области мантии, где наблюдается подъем расплавленных пород. Их современное и древнее положение можно определить по таким геологическим структурам, как Гавайские острова, которые остаются на месте, когда литосферная плита проходит над горячей точкой.

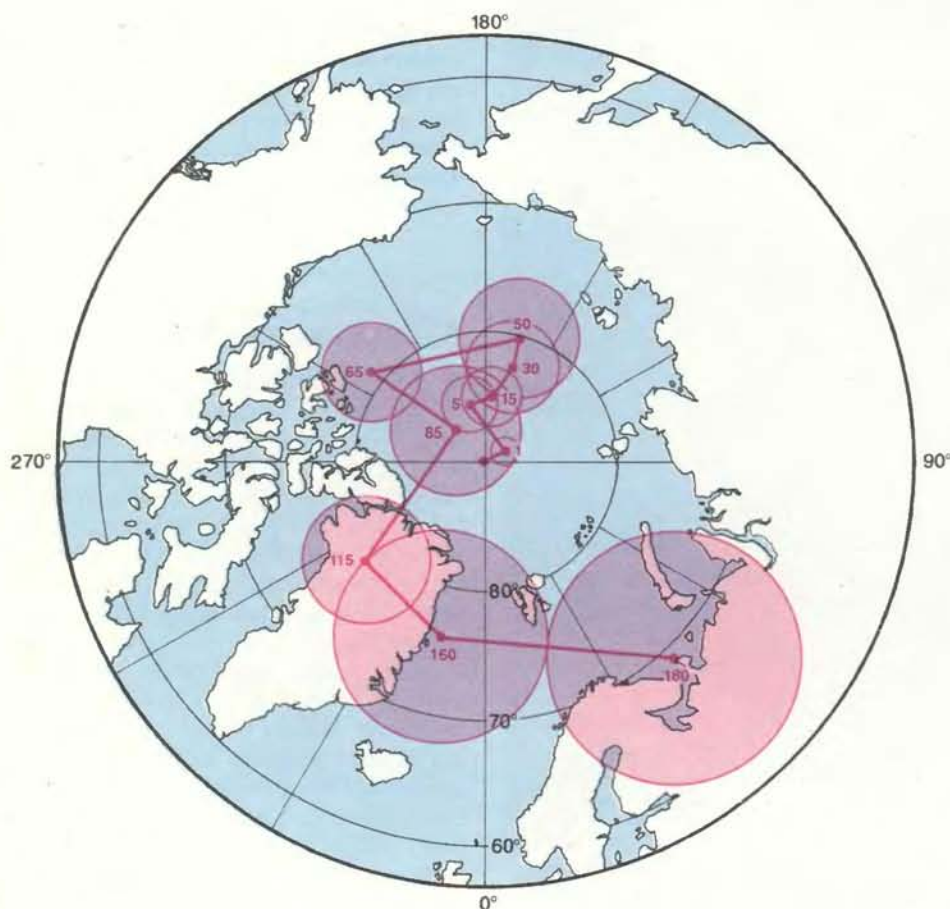
Определение средних положений древних магнитных полюсов относительно древних положений горячих точек указывает на то, что горячие точки, а следовательно, и мантия вместе с литосферой двигались синхронно, так что примерно 180 млн. лет назад Северный полюс был смещен по широте на 22° от своего современного положения.

Что может быть причиной такого скольжения внешних слоев Земли? Эндрюс полагает, что наиболее вероятное объяснение было предложено 30 лет назад Т.Голдом из Корнеллского университета. Он отметил, что если мантия Земли достаточно пластична, то наличие в ней областей с высокой плотностью может быть причиной крупномасштабного перемещения земной поверхности. Используя уравнения, которые описывают вращение тел, он показал, что «лишняя» масса, помещенная на вращающейся, деформируемой сфере, будет причиной такого распределения масс в сфере, при котором достигается состояние с минимальным значением энергии. В случае пластичной сферы вся поверхность смещается таким образом, чтобы «лишняя» масса в конечном итоге попала на экватор.

Установление факта смещения оболочки Земли относительно ее центра независимо от того, какие причины вызывают это смещение, должно отозваться во многих областях геологии. Так, может быть пересмотрен ряд палеогеографических и палеоклиматических выводов, которые в значительной степени зависят от точного определения палеошироты.

Долой сорняки!

В НАСТОЯЩЕЕ время, когда значительно расширилось наше знание экологических законов, назрела острая необходимость в биологических методах борьбы с сорняками и вредителями растений. Так, распространяя не способных к размножению взрослых особей мясной мухи



КАЖУЩАЯСЯ МИГРАЦИЯ Северного полюса объясняется скольжением мантии и литосферы относительно центра Земли (в действительности положение полюса в пространстве не изменяется). Точки на концах отрезков отмечают положение полюса на поверхности Земли в прошлом (миллионы лет назад). Окружность вокруг каждой точки определяет ошибку расчетов. Показано современное положение и очертание континентов.

и комаров, можно добиться значительного сокращения популяций этих насекомых, не применяя химические пестициды. Недавно было предложено использовать подобную тактику для замены синтетических химических гербицидов. Уже сделан первый шаг: с помощью грибковых токсинов попытались бороться с бермудской травой.

Некоторые разновидности бермудской травы полезны — они могут предотвращать эрозию почв и прекрасно подходят для создания газонов. Но более чем в 80 странах это растение считается вредным сорняком, мешающим выращиванию как минимум 40 различных сельскохозяйственных культур, в особенности сахарного тростника. (Кроме того, бермудская трава может вызывать сенную лихорадку.) Ф. Сугавара и Г. Стробел из Университета шт. Монтана совместно с Л. Фишером, Г. Ван Дайном и Дж. Кларди из Корнеллского университета сообщили в журнале «Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA», что им удалось выделить и охарактеризовать продуцируемое одним из видов грибков вещество, называемое биполароксином, которое оказалось токсичным для бермудской травы. (Некоторые другие растения, такие, как культурные злаки и дикий овес, тоже чувствительны к действию этого токсина, однако при значительно больших его концентрациях.) Исследователи считают, что среди известных на сегодня биологических средств борьбы с сорняками биполароксин обладает наиболее избирательным действием.

Сугавара и Стробел работали с лабораторными культурами грибка *Bipolaris cynodontis*, который вызывает поражение листьев у растений. Для идентификации токсина последовательно выделяемые из грибка фракции вносились в маленькие круглые ранки на листочках бермудской травы, после чего отмечалось, появляются ли пятна или участки некроза тканей. Выделив полароксин, Сугавара и Стробел получили его в кристаллическом виде, что дало возможность Фишеру, Ван Дайну и Кларди охарактеризовать его молекулу с помощью метода рентгеноструктурного анализа.

Хотя до использования биполароксина на полях еще далеко, тем не менее проведенные исследования многое дали для понимания молекулярной структуры и механизма биологической активности этого токсина, что может способствовать поискам новых гербицидов в природных источниках и разработке путей их получения.

Книги издательства „Мир“

ФИЗИКА ИОН-ИОННЫХ И ЭЛЕКТРОН-ИОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Под редакцией Ф. Бруйара, Дж. Мак Гоуэна.

Перевод с английского

Книга содержит тексты лекций по физике ион-ионных и электрон-ионных соударений. Всего в книгу включено 12 лекций.

В целом книга представляет собой уникальное издание, с максимальной полнотой охватывающее важнейшие направления физики атомных столкновений.

В книге освещаются следующие вопросы. Астрофизические явления, в которых существенную роль играют столкновения электронов и протонов с ионами. Излагается плазмохимическая сторона вопроса об эволюции ранней Вселенной. Рассмотрены: процессы, происходящие в газовых туманностях, в горячей плазме звездных корон, в кометах, в межзвездных облаках, атмосферах планет и др.; роль атомных столкновений в термоядерной плазме, влияние примесей тяжелых атомов и ио-

нов на баланс энергии и характер нагрева плазмы в токамаках и др.; диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов (основное внимание уделено обсуждению поведения термов молекулярного иона и квазимолекулы, участвующих в процессе); возбуждение ионов электронным ударом; экспериментальные исследования процессов электрон-ионной рекомбинации; изменение параметров неупругих электрон-ионных и ион-ионных соударений; удержание заряженных частиц в экспериментах по исследованию столкновений; исследование ион-ионной рекомбинации в плазме.

Для исследователей, занимающихся физикой низко- и высокотемпературной плазмы, верхней атмосферы, газовых лазеров, а также атомной, молекулярной и химической физикой.

1986, 27 л. Цена 4 р. 10 к.

С. Мьюрарка СИЛИЦИДЫ ДЛЯ СБИС

Перевод с английского

В книге рассмотрены и обобщены результаты исследований электрических, термодинамических, механических свойств силицидов — соединений кремния с переходными металлами. Дано описание методов использования силицидов в технологии СБИС, приведены конкретные примеры использования силицидной технологии при создании полупроводниковых электронных приборов. В книге содержится большой объем тщательно систематизированного экспериментального материала.

Из рецензии доктора техн. на-

ук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Ю.Д. Чистякова: «В книге подводятся итоги за последние 10—15 лет и высказываются конкретные предложения по использованию силицидных пленок в технологии электроники, что особенно важно в связи с переходом технологии микроэлектроники на субмикронные размеры при изготовлении СБИС».

Для широкого круга специалистов в области полупроводниковой техники и материаловедения, а также для студентов и аспирантов.

1986, 12 л. Цена 2 р. 60 к.



Наука вокруг нас

С помощью самодельного поляриметра можно анализировать оптически активные вещества

ДЖИРЛ УОЛКЕР

РАСТВОРЫ, содержащие оптически активные вещества, вращают плоскость поляризации проходящего через них света. Это явление свидетельствует об асимметрии структуры соединения. Оно имеет также практическое значение и может применяться для контроля за содержанием сахара в пищевых продуктах и в процессе очистки сахара. С. Эпштейн из Лос-Анджелеса сконструировал недорогой поляриметр для измерения оптической активности различных веществ.

В классической теории свет представляется распространяющейся электромагнитной волной. На схемах свет часто изображают в виде луча, указывающего направление его распространения. В каждой точке луча можно нарисовать векторы напряженности электрического и магнитного полей (они служат характеристиками поля). Эти векторы всегда перпендикулярны лучу и изменяются вдоль луча по величине и направлению так, что весь рисунок напоминает волну. При прохождении света через фиксированную точку электрическое и магнитное поля периодически изменяются. (В дальнейшем речь будет идти лишь об электрическом поле).

Когда свет не поляризован, электрический вектор может быть ориентирован в любом направлении, перпендикулярном лучу. Если же свет проходит через поляризационный светофильтр, колебания ограничива-

ются одним направлением. В этом случае говорят, что свет поляризован; направление его поляризации указывают вектором со стрелками на обоих концах. Влияние фильтра представляется воображаемой линией (осью поляризации), параллельной направлению поляризации света.

Если на пути распространения света поставить второй поляризационный светофильтр, то интенсивность прошедшего через него света будет зависеть от ориентации этого светофильтра. Если его ось поляризации параллельна направлению колебаний в падающем луче, то свет будет полностью проходить через фильтр; если ось поляризации перпендикулярна колебаниям в падающем луче, то свет будет полностью задерживаться. При промежуточных положениях светофильтра проходящий свет будет иметь промежуточное значение интенсивности.

Тот светофильтр, который расположен ближе к источнику света, называют поляризатором, другой — анализатором. С помощью этого устройства можно наблюдать, как меняется интенсивность света, выходящего из анализатора, повернутого относительно падающего луча. Когда оси двух светофильтров параллельны, наблюдатель видит наиболее яркий свет. При повороте анализатора на 90° свет исчезает; это положение анализатора называют «конечной точкой».

Растворы оптически активных соединений, таких, как молочная кислота, шавелевая кислота, никотин, скипидар, аминокислоты и витамины, вращают плоскость поляризации проходящего через них света. От других веществ они отличаются пространственной структурой. В оптически активном соединении один или больше атомов углерода связаны каждый с четырьмя различными атомами или группами. Когда свет проходит через такую систему, электрическое поле взаимодействует с ней так, что плоскость поляризации падающего луча поворачивается.

Предположим, что кювета, в которую налит раствор оптически актив-

ного соединения, находится между двумя светофильтрами. Когда поляризованный свет проходит через раствор, направление поляризации вращается вокруг луча. Следовательно, когда луч достигает анализатора, направление его поляризации отличается от первоначального. Чтобы поляризованный свет не прошел через анализатор, последний надо повернуть до новой конечной точки. Изучая оптическую активность растворов, вы измеряете угол поворота анализатора, при котором свет не проходит через него.

Направление вращения плоскости поляризации определяется относительно наблюдателя. Говорят, что вещество правовращающее, если оно вращает плоскость поляризации вправо, или по часовой стрелке; если вращение происходит против часовой стрелки, вещество называется левовращающим. Степень вращения зависит от числа оптически активных молекул, через которые свет проходит в кювете с образцом. Степень вращения увеличивается с возрастанием толщины слоя и концентрации раствора; она прямо пропорциональна также длине волны падающего света.

Чтобы описать вращение плоскости поляризации света, используют понятие удельного вращения. В работе Эпштейна оно равно углу, на который поворачивается плоскость поляризации при прохождении света через слой раствора толщиной 1 дм с концентрацией оптически активных молекул 100 г на 100 мл. (Иногда удельное вращение определяют в других единицах.) Как правило, используется свет с длиной волны 589 нм, которая соответствует желтой линии испускания натрия. Температура исследуемого раствора обычно составляет 20 °С.

В поляриметре Эпштейна источником света служит лампа накаливания мощностью 60 Вт. Свет от источника направляется на светофильтр и через коллиматор (коллиматорную линзу) попадает в корпус, где находится кювета с исследуемым раствором. В корпусе луч отражается от зеркала вверх, проходит через поляризатор, кювету, затем через конденсатор (конденсорную линзу) и анализатор и попадает в окуляр, с помощью которого определяется «конечная точка».

Лампа с патроном установлена на деревянной подставке и закрыта перевернутой консервной банкой; банка должна быть приподнята над подставкой примерно на 2,5 см, чтобы в нее мог проходить воздух. Отверстия, сделанные в верхней части банки, позволяют нагреваемому лампой воздуху выходить наружу. Сбоку в банке проделано отверстие, в которое



вставлена длинная трубка из поливинилхлорида с внутренним диаметром 2,5 см. Другой конец трубки закрыт тонким матовым стеклом.

Поскольку большинство данных по удельному вращению оптически активных соединений приводится для желтой линии натрия, Эпштейн фильтровал белый свет, испускаемый лампой. Он избежал расходов на покупку готового цветного светофильтра, сделав его сам. Для этого он использовал сосуд прямоугольной формы с двумя «окошками», сделанными из предметных стекол. Крышка сделана из пластмассы и плотно закрывается, чтобы уменьшить испарение раствора. Остальные части склеены между собой эпоксидным клеем. В сосуде находится 10%-ный водный раствор дихромата калия (10 г на 100 мл раствора). Сосуд установлен в защитном корпусе из листовой стали или мазонита толщиной 6 см, который в свою

очередь стоит на деревянной опоре так, чтобы через окошки мог проходить свет.

Раствор дихромата калия действует как цветной светофильтр: он пропускает свет в узком интервале длин волн, близком к желтой линии испускания натрия. Поэтому устройство, состоящее из источника света и цветного светофильтра, сделанного Эпштейном, дает приблизительно такой же свет, как выпускаемые промышленностью натриевые лампы.

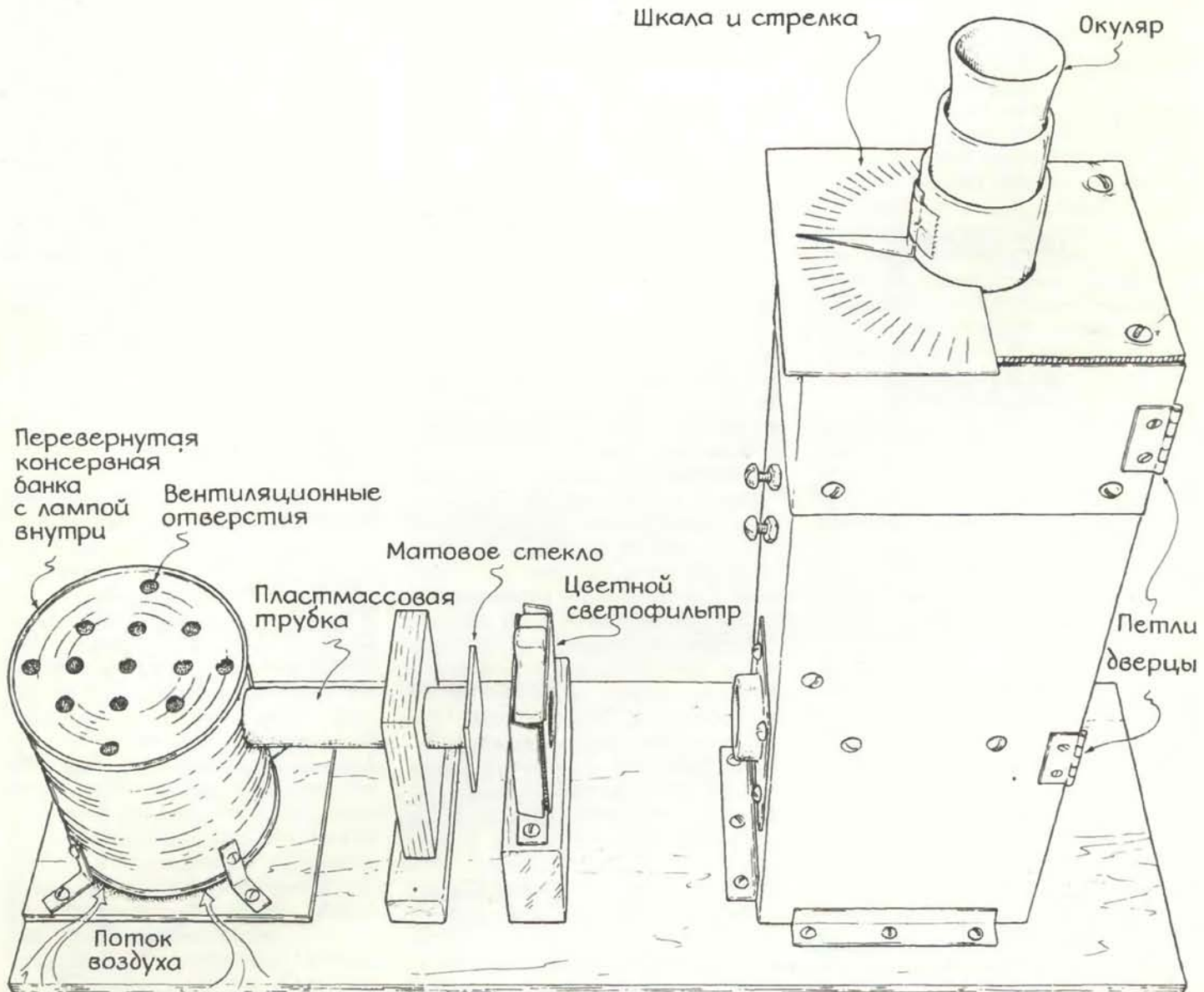
Кожух с кюветой установлен на подставке из фанеры или мазонита. Все внутренние поверхности равномерно выкрашены в черный цвет, чтобы исключить рассеяние света. С одной стороны корпуса сделана дверца, для того чтобы доставать кювету.

Расстояние между цветным светофильтром и коллиматором равно фокусному расстоянию последнего, поэтому после светофильтра свет идет

через устройство в виде пучка примерно параллельных лучей. Линзу помещают в трубку из поливинилхлорида, чтобы избежать попадания постороннего света. Зеркало с передней отражающей поверхностью приклеено эпоксидным клеем к деревянной подставке под углом 45° к горизонтали. Эпштейн указывает, что выбор правильного направления оптического пути имеет принципиальное значение.

Несколько выше зеркала находится перегородка, сделанная из фанеры толщиной 0,6 см или из мазонита. Зеркало направляет свет через отверстие диаметром около 1,5 см, вырезанное в перегородке. К нижней стороне перегородки приклеен поляризатор.

Эпштейн сделал поляризатор в виде «сэндвича» из поляризационного светофильтра квадратной формы и двух предметных стекол. Светофильтр фиксируется двумя половинками биб-



Поляриметр, сконструированный С. Эпштейном

лиографической карточки. По краям предметные стекла оклеены прозрачной лентой, которая заходит на 0,3 см внутрь, для того чтобы поляризатор не менял своего положения. Чтобы склеить все устройство, нужно нанести капли эпоксидного клея на

обе стороны каждой половинки карточки.

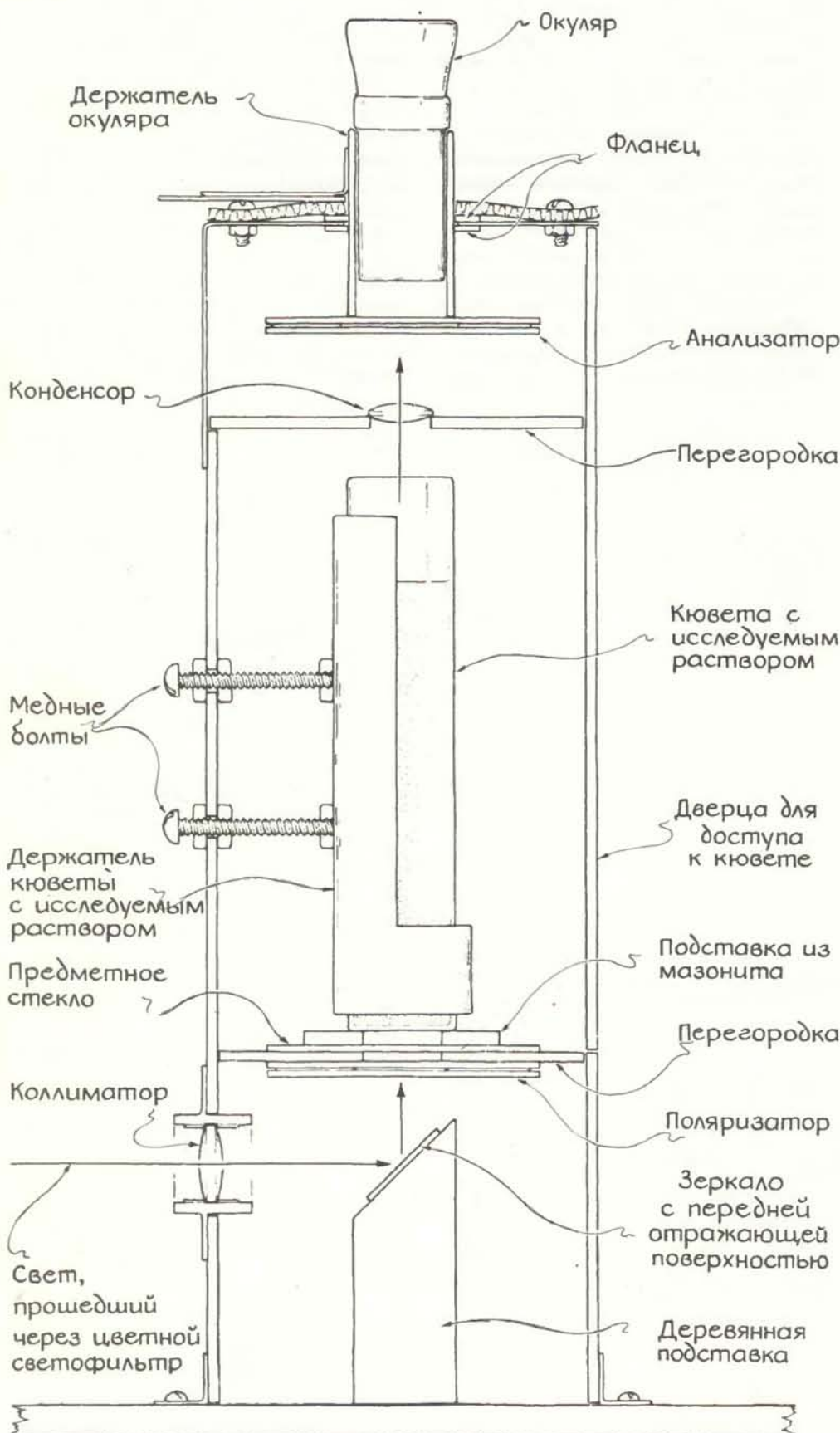
Сверху к отверстию в перегородке плотно прилегает другое предметное стекло, которое предохраняет поляризатор и зеркало от попадания капель исследуемого раствора. На это

предметное стекло положена прокладка из мазонита толщиной 2,5—5 см. Отверстие в прокладке должно совпадать с отверстием в перегородке. Кювета с анализируемым раствором установлена на прокладке и центрируется относительно луча света с помощью трубки из поливинилхлорида длиной 15 см, разрезанной так, чтобы в верхних 12 см она имела в поперечном сечении полукольцо. Трубка крепится к корпусу двумя медными болтами.

Нижняя часть кюветы должна иметь плоскую поверхность, чтобы не искривлять световой пучок. В качестве кюветы Эпштейн использовал 50-миллиметровые трубки для сравнения цвета. Трубка вставляется в держатель из поливинилхлорида и покоится на подставке из мазонита.

Каждая такая трубка стоит около 8 долл., поэтому Эпштейн предлагает делать кювету из прозрачной пластмассовой трубки диаметром 2,5 см и толщиной стенок 0,15 см. Нужно взять трубки длиной 15 см и один конец отшлифовать так, чтобы он был плоским. К этому концу надо приклеить предметное стекло со стороной 3,75 см, центрируя его относительно трубки. В качестве клея надо взять эпоксидную смолу; место склеивания должно быть водонепроницаемым.

Это устройство имеет два недостатка. Держатель из поливинилхлорида вам придется модифицировать так, чтобы кювета плотно сидела в нем. Более серьезная проблема заключается в том, что такая кювета не-



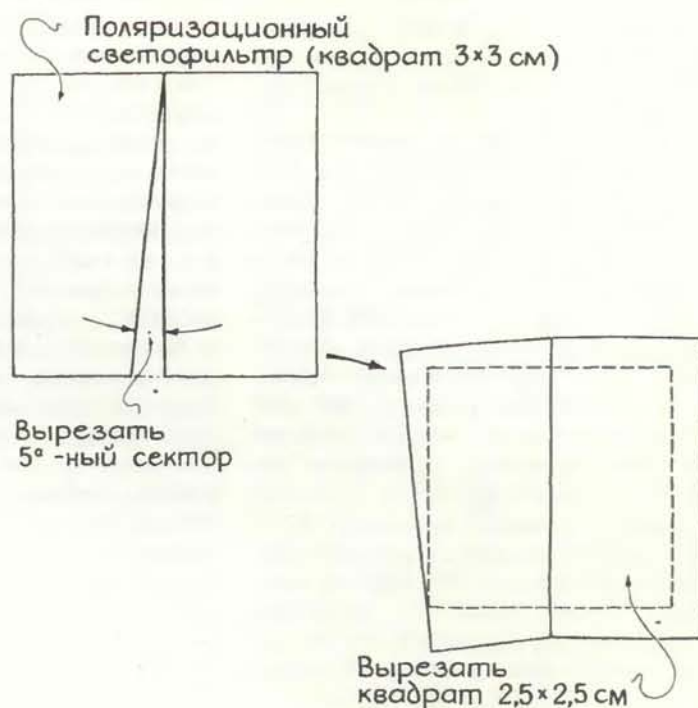
Часть установки, где размещена кювета с исследуемым раствором



Цветной светофильтр Эпштейна



Как собрать поляризатор



Скошенные части анализатора

пригодна для исследования некоторых органических растворителей.

Над кюветой расположен конденсор, который направляет луч света из ячейки в анализатор, а затем в окуляр. Анализатор сделан так же, как поляризатор — в виде сэндвича, но с одним существенным отличием: его светофильтры скошены. Для его изготовления берется квадратный поляризационный светофильтр со стороной ~ 3,1 см и на его оси вырезается треугольный сегмент с углом при вершине 5°; затем обе половины плотно сдвигаются и обрезаются по краям так, чтобы получился квадрат со стороной 2,5 см. Этот квадрат помещают между предметными стеклами.

Скошенное расположение светофильтров в анализаторе облегчает определение «конечной точки». В противном случае приходится угадывать положение анализатора, при котором он наилучшим образом задерживает свет, идущий из раствора. При скошенных светофильтрах можно просто сравнить яркость света, идущего через каждую половину светофильтра. Конечная точка соответствует положению, в котором обе части имеют одинаковую яркость. Если повернуть анализатор в любом направлении от конечной точки, одна его половина станет ярче, а другая — темнее. Следовательно, скошенное расположение светофильтров позволяет определить положение «конечной точки» наиболее точно.

Анализатор приклеивается к нижней части держателя для объектива. Держатель проходит через отверстие в корпусе и крепится двумя фланцами

так, чтобы он мог свободно вращаться. Объективом может служить простая линза или объектив низкой светосилы. Шкала вокруг держателя объектива калибруется в градусах.

Установите стрелку на шкале в направлении на источник света и поворачивайте держатель окуляра (и, таким образом, анализатор), наблюдая за яркостью света в объективе. Найдите положение, при котором обе половинки анализатора освещены одинаково, и переведите стрелку на 0°.

Дно кюветы может иметь дефекты, которые изменяют поляризацию света. Чтобы избежать искажений, залейте в кювету 50 мл воды и поместите ее в прибор. Поворачивая кювету, наблюдайте за яркостью света в объективе до тех пор, пока не получите наиболее полное изображение и не достигнете «конечной точки». В этом положении нанесите метки на держателе кюветы и на самой кювете. Каждый раз, когда кювету надо будет использовать для анализа раствора, помещайте ее в держатель так, чтобы метки совпадали. Такую процедуру надо проделать для каждой кюветы.

Эпштейн исследовал оптическую активность раствора обычного сахара (сахарозы). Сначала в кювету наливают 50 мл воды и помещают ее в поляриметр так, чтобы метка на кювете совпала с меткой на ее держателе. Поворачивайте окуляр до «конечной точки». Заметьте соответствующее положение стрелки на шкале. Замените воду раствором сахара (50 мл) с концентрацией 20 г на 100 мл. Снова определите «конечную точку». Эпштейн обнаружил, что стрелка повер-

нулась на 17° в направлении по часовой стрелке от положения, соответствующего чистой воде.

Величину оптического вращения можно рассчитать. Удельное вращение для сахара составляет 66,5° (по часовой стрелке). В установке Эпштейна длина пути света равна 1,3 дм. Чтобы вычислить ожидаемое вращение, надо удельное вращение умножить на концентрацию раствора (в граммах на 1 мл) и длину слоя (в дециметрах). При желании можно определить, как зависит оптическое вращение от концентрации раствора сахара.

Эпштейн исследовал также хорошо известную реакцию, при которой сахароза превращается в два более простых по структуре сахара: глюкозу и фруктозу. (Этот процесс называется инверсией сахаров.) В колбе на 100 мл растворите 20 г обычного сахара в 50 мл воды. Хорошо перемешайте. Затем приготовьте водный раствор соляной кислоты в соотношении 1 часть кислоты на 3 части воды. Добавьте этот раствор в колбу и перемешайте смесь. Положите в колбу термометр и поставьте ее на водяную баню с температурой 70 °С. Наблюдайте за температурой раствора, пока она не достигнет 67 °С. (Не держите колбу на водяной бане более 5 мин. Не допускайте, чтобы температура раствора превысила 69,5 °С.)

Перенесите колбу на другую водяную баню с температурой 20 °С. Когда температура раствора упадет до 35 °С, снимите колбу с водяной бани. Когда температура раствора достигнет 20 °С, ополосните термометр 25 мл воды, направляя струю

воды в колбу. Добавляйте воды столько, чтобы довести объем раствора в колбе до 100 мл. Снова перемешайте смесь.

Поместите колбу на водяную баню при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ еще на 15 мин. Если необходимо, добавьте воды, чтобы объем раствора составил 100 мл. Перемешайте раствор и налейте 50 мл его в кювету. Установите кювету в поляриметр и определите оптическое вращение этого раствора. Эпштейн получил величину $2,8^{\circ}$ (против часовой стрелки).

В исследуемом растворе при расщеплении сахарозы, катализируемом соляной кислотой, образуется по 10,5 г глюкозы и фруктозы. Удельное вращение глюкозы составляет $52,5^{\circ}$ (по часовой стрелке), а удельное вращение фруктозы — 93° (против часовой стрелки). Вычислим оптическое вращение, обусловленное этими двумя продуктами реакции. Глюкоза

должна поворачивать направление поляризации света примерно на $7,16^{\circ}$ (по часовой стрелке), а фруктоза — примерно на $12,7^{\circ}$ (против часовой стрелки). Поскольку вращение происходит в противоположных направлениях, для вычисления среднего вращения берется разность этих двух чисел и делится на 2. В результате получается величина $2,8^{\circ}$ (против часовой стрелки) — такая же, как у Эпштейна.

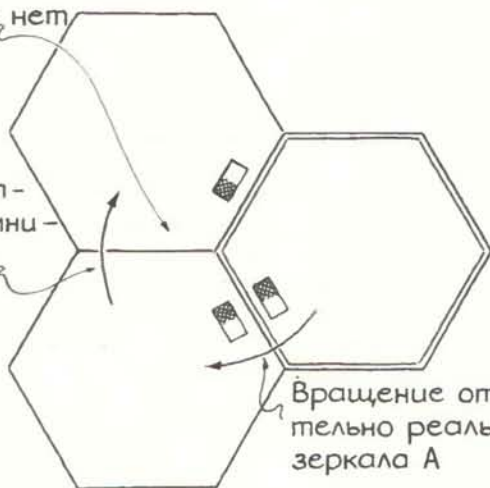
Интересно также изучить оптическое вращение различных сиропов. Налейте 25 мл сиропа в колбу емкостью 100 мл; сполосните сосуд, где был сироп, водой (25 мл) и вылейте ее в колбу. Добавьте две капли концентрированного раствора гидроксида аммония, который используется как катализатор. Хорошо перемешайте смесь, добавьте воды, чтобы довести объем раствора до 100 мл, и снова перемешайте. Налейте 50 мл получен-

ного раствора в кювету поляриметра и измерьте оптическое вращение. В таких растворах молекулы сахаров претерпевают перегруппировку (этот процесс называется мутаротацией), пока не будет достигнуто состояние равновесия в смеси. До достижения равновесия оптическая активность таких растворов меняется. Оптическое вращение можно измерять каждые 15 мин до тех пор, пока оно не перестанет меняться.

Таким же способом можно изучать оптическую активность меда различных сортов. Инверсию сахаров можно использовать для определения оптической активности желатина, безалкогольных напитков и разных жидкостей, содержащих сахар. (Если вы берете желатин с добавками, убедитесь, что он желто-оранжевого цвета, близкого к цвету линии испускания натрия.) Попробуйте сравнить также

Изображения нет

Вращение относительно мнимого зеркала



Изображение есть

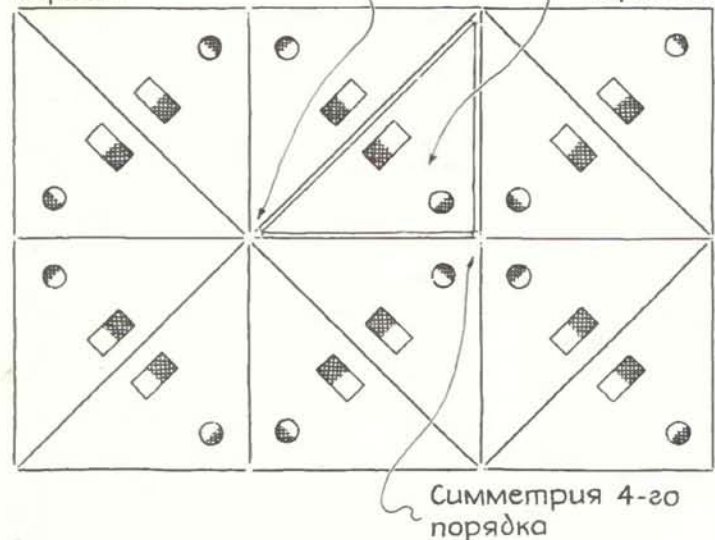
Вращение относительно реального зеркала В



Неоднозначность поля изображений в системе зеркал, расположенных по сторонам шестиугольника

Симметрия 8-го порядка

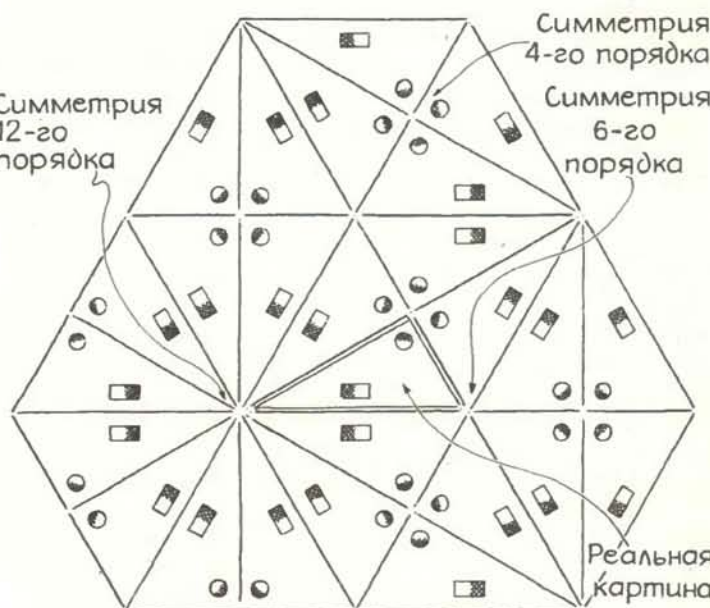
Реальная картина



Симметрия 12-го порядка

Симметрия 4-го порядка

Симметрия 6-го порядка



Калейдоскоп с двумя типами симметрии

Калейдоскоп с тремя типами симметрии

оптическое вращение натуральных и подслащенных фруктовых соков.

В ПРЕДЫДУЩЕМ номере журнала в рубрике «Наука вокруг нас» была опубликована статья, в которой рассматривались оптические явления в калейдоскопах, состоящих из двух и из трех зеркал. В каждом типе калейдоскопа можно наблюдать картину, которую создают находящиеся в нем предметы и их зеркальные отражения. В системе из двух зеркал изображения лежат в секторах, имеющих форму кусков круглого торта, и группируются вокруг линии стыка зеркал. В системе из трех зеркал зеркальными изображениями заполняется все поле зрения. Если вы смотрите в калейдоскоп, то кажется, что изображения лежат в плоскости (она называется полем изображений), которая проходит через реальное изображение предмета. В большинстве устройств из трех зеркал поля изображений являются неоднозначными в том смысле, что «содержимое» любой области этого поля зависит от угла, под которым вы смотрите в калейдоскоп. Допустим, что в определенном месте поля вы видите красную бусинку. Стоит поменять направление взгляда, и вместо бусинки вы увидите что-то другое. Поля изображений в калейдоскопе, зеркала которого образуют равносторонний треугольник или прямоугольник, являются однозначными в том смысле, что их содержимое не зависит от угла зрения.

Какие другие системы зеркал создают однозначные поля изображений? Вначале я считал, что единственное требование заключается в том, чтобы оптическая система заполняла поле изображений перекрывающимися копиями реального изображения (представьте себе пол, покрытый одинаковыми изразцовыми плитками). Когда же я рассмотрел конструкцию из зеркал, составленных в виде шестиугольника (как показано на верхнем рисунке на с. 88), я обнаружил, что был неправ. В обеих половинах рисунка имеются реальное изображение и два зеркально отраженных шестиугольника. Относительно просто получить отраженные шестиугольники, вращая реальное изображение вокруг одной стороны шестиугольника, пока оно вновь не окажется в плоскости изображения. Затем, вращая отраженный шестиугольник вокруг одной из его сторон, вы получите второй отраженный шестиугольник.

Первая половина рисунка показывает, как, начав с реального изображения, а затем, совершив два вращения (в плоскости они соответствуют вращению по часовой стрелке), я по-

лучил два отраженных шестиугольника. Для того чтобы получить шестиугольник, который находится внизу слева, я поворачивал реальное изображение вокруг реального зеркала А. Затем я поворачивал этот шестиугольник вокруг его верхней стороны и получал шестиугольник, расположенный вверху слева.

Сторона отраженного шестиугольника называется мнимым зеркалом: оно обладает свойствами реального зеркала, хотя в действительности является лишь его изображением. Следовательно, второй отраженный шестиугольник образуется в мнимом зеркале. В результате проделанной процедуры я получил два отраженных шестиугольника, которые видел бы наблюдатель, смотрящий в зеркало А в направлении этих шестиугольников в поле изображения.

Вторая половина рисунка показывает, как я начал с реального изображения и двигался против часовой стрелки, чтобы найти положение отраженных шестиугольников, которые видел бы наблюдатель, смотрящий в зеркало В. Заметим, что две пары шестиугольников отличаются содержанием. Поле изображений является, таким образом, неоднозначным.

Поупражнявшись с шестиугольниками и другими многоугольниками, я наконец понял, какой порядок расположения зеркал дает однозначное поле изображений. При любом расположении зеркал ключевой процедурой является проверка каждой оси — линии стыка двух зеркал. Глядя в систему, вы видите сектор с реальным изображением; вокруг оси располагаются отражения этого сектора. Чтобы найти отражения, представьте себе, что сектор с реальным изображением вращается вокруг одной из своих сторон до тех пор, пока снова не оказывается в поле изображения. Затем вращайте вновь полученный сектор вокруг одной из его сторон. Продолжайте совершать вращения по часовой стрелке и в противоположном направлении до тех пор, пока секторы не начнут перекрываться. Если картины накладываются до полного совпадения, то поле изображений вокруг оси будет обязательно однозначным. Этим свойством обладают вершины только тех углов, которые в четное число раз меньше 360° .

Если от системы зеркал требуется, чтобы она давала однозначное поле изображений, каждая ось в этой системе должна удовлетворять этому условию. Равносторонний треугольник и прямоугольник ему удовлетворяют. Интересно, что существуют лишь два других многоугольника — оба прямоугольные треугольники, —



которые также удовлетворяют этому требованию; один с углами по 45° , другой с углами 30° и 60° . Я не знаю, описаны ли уже кем-нибудь эти системы.

Четыре упомянутых многоугольника, которые создают однозначные поля изображений, отличаются по типу симметрии, характерной для этих полей. Равносторонний треугольник приводит к образованию групп изображений, которые имеют симметрию шестого порядка. Каждая группа состоит из шести изображений, которые являются либо идентичными, либо зеркальными копиями реальной картины. Поле изображений, создаваемое зеркалами, составленными в виде прямоугольника, состоит из групп, которые имеют симметрию четвертого порядка. Системы зеркал с прямоугольным треугольником в сечении образуют группы изображений с другими видами симметрии. В одной из них вершина при прямом угле создает симметрию четвертого порядка, а вершины при угле 45° — симметрию восьмого порядка.

В системе с треугольным сечением (с углами 60° и 30°) возникает самая красивая картина, поскольку в ней присутствуют три вида симметрии — больше, чем в любом другом однозначном поле изображений. Вершина прямого угла является центром симметрии 4-го порядка, вершина при угле 60° — центром симметрии 6-го порядка и вершина при угле 30° — центром симметрии 12-го порядка. Калейдоскоп такого типа сделать трудно, поскольку зеркала образуют в сечении прямоугольный треугольник, гипотенуза которого вдвое длиннее короткого катета.

Занимательный компьютер

Исследование звездных скоплений с помощью компьютерного телескопа

А. К. ДЬЮДНИ

ДАЛЕКО в космическом пространстве под музыку гравитационных сил в хороводе кружится скопление звезд. На протяжении человеческой жизни их движение мы почти не замечаем, но если рассматривать его в другом временном масштабе, когда годы эквивалентны секундам, то можно увидеть причудливые переплетения звездных траекторий. Иногда две звезды, приблизившись друг к другу, исполняют парный танец, а затем одна из них стремительно уносится в окружающее пространство.

С помощью мощного телескопа можно рассмотреть структуру некоторых звездных скоплений нашей Галактики, но он не позволяет сжать годы в секунды — это может сделать только компьютер. Кроме того, компьютер можно запрограммировать так, что он будет играть роль своеобразного телескопа, позволяющего разглядывать гипотетические звездные скопления. При этом можно наблюдать движение отдельных объектов скопления в космическом временном масштабе, получая последовательность фотоснимков, на которых фиксируются пунктирные траектории каждой звезды, выходящие и переплетающиеся с траекториями других звезд скопления (см. рисунок на с. 91).

Объясняется ли эволюция звездных скоплений, наблюдаемая астрономами, только гравитационными силами? Компьютеры помогают дать ответ как на этот вопрос, так и на другие, связанные с ним. В мае 1984 г. в Принстонском университете на очередном 113-м симпозиуме Международного астрономического общества, на этот раз целиком посвященном динамике звездных скоплений, теоретики и специалисты по моделированию обсуждали проблему соответствия между гипотетическими и реальными звездными скоплениями.

Поставить космический балет при помощи компьютера сравнительно несложно. В принципе взаимодействия между звездами, входящими в скопление, описываются простым классическим законом: каждая звезда

в паре с каждой другой звездой испытывает действие гравитационной силы, пропорциональной произведению масс звезд рассматриваемой пары и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Вычисления по этой формуле выполнить нетрудно: нужно перемножить массы звезд, полученное произведение умножить на коэффициент пропорциональности (гравитационную постоянную) и результат разделить на квадрат расстояния между звездами. Суммарный эффект всех парных взаимодействий, по-видимому, полностью определяет характер изменений, претерпеваемых со временем звездным скоплением. Программа CLUSTER вычисляет результирующую силу, действующую на каждую звезду, и перемещает эту звезду в следующее по времени положение. Процедура циклически повторяется на заданном отрезке времени, соответствующем нескольким столетиям, по принятому в модели масштабу.

Правда, вводить с клавиатуры координаты и скорости большого числа звезд — занятие довольно скучное, но зато вы видите, как перед вами на экране разворачивается эволюция миниатюрной вселенной. Звезды в центральной части скопления движутся по неустойчивым хаотическим орбитам, а те, которые находятся в периферийных областях, медленно уплывают, останавливаются и плавно возвращаются назад. Наиболее интересно наблюдать, как звезды сталкиваются и как некоторые из них покидают скопление.

Когда две звезды сближаются, они сообщают друг другу колоссальные гравитационные ускорения и после столкновения стремительно расходятся в разные стороны. Стремительный выход отдельных звезд за пределы скопления обычно является результатом одного или более таких сближений. Звезда, покинувшая скопление, может вернуться в него, а может и не вернуться. Астрономическое тело обладает определенной скоростью отрыва, зависящей от его массы и массы того тела или объекта, от которого оно отрывается. Если звезда,

удаляющаяся от скопления, достигла этой скорости, она никогда к нему не вернется. Те, кто еще не имеют опыта в моделировании звездных скоплений, наверное, часто будут наблюдать «побеги» звезд из составленных ими конфигураций скоплений. На самом деле в звездных скоплениях, построенных новичками, звездный хоровод быстро распадается. Лучше всего начинать с несложных двойных или тройных звездных систем.

Программа CLUSTER имеет простую структуру. Она состоит из цикла инициализации, за которым следует двойной цикл, в котором вычисляются изменения скорости, ускорения и положения каждой звезды как результат суммарного воздействия со стороны остальных звезд. Здесь мы рассмотрим простейшую версию программы, в которой такие величины, как интервал между двумя соседними моментами времени, коэффициент пропорциональности в формуле притяжения и массы звезд, являются как бы «встроенными», т. е. фиксированными. Несмотря на свою простоту, даже эта версия программы CLUSTER способна моделировать почти все явления, присущие звездным скоплениям. В программе используются три множества массивов. В массивах первого множества хранятся значения ускорений, которыми обладают звезды на данный момент в каждом направлении по трем осям координат. Имена этих массивов соответственно ax , ay и az . Таким образом, $ax(i)$, $ay(i)$ и $az(i)$ указывают компоненты ускорения i -й звезды по осям x , y и z . Элементы этих трех массивов не обязательно инициализировать (т. е. присваивать им начальные значения) перед выполнением программы. Массивы второй группы vx , vy и vz хранят значения скоростей: $vx(i)$, $vy(i)$ и $vz(i)$ указывают соответственно компоненты скорости i -й звезды вдоль осей x , y и z . Массивы третьей группы предназначены для координат положения звезд: $x(i)$, $y(i)$ и $z(i)$ соответственно указывают координаты положения i -й звезды в данный момент по осям x , y и z . Элементы массивов x , y , z и vx , vy и vz следует инициализировать в начале программы.

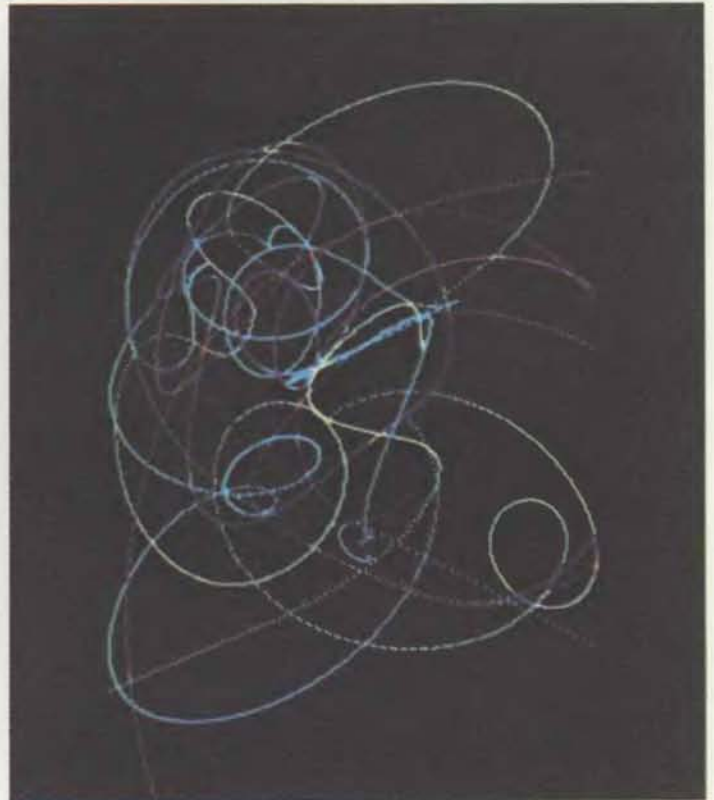
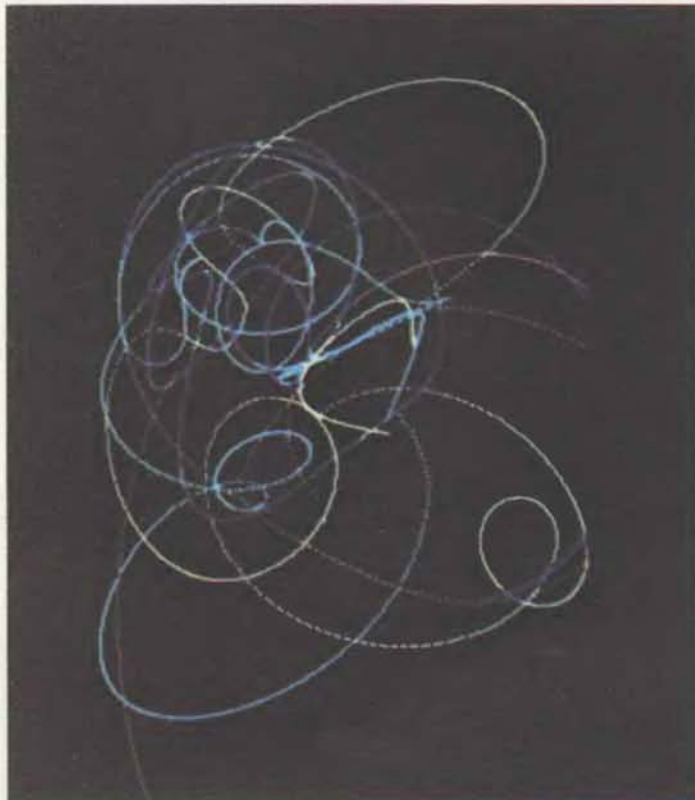
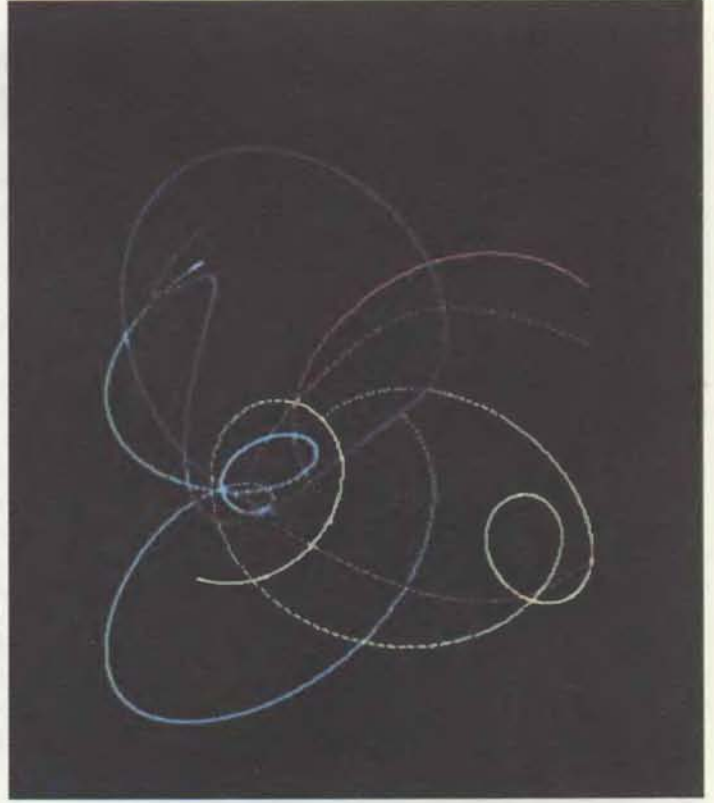
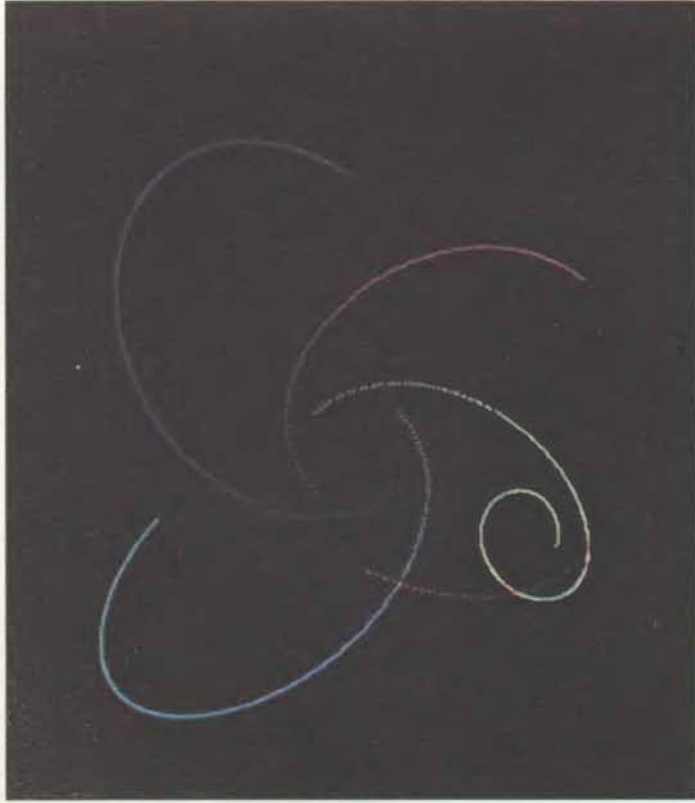
Вслед за блоком инициализации идет главная часть программы CLUSTER. Двойной цикл может повторяться автоматически до бесконечности, или же программист должен указать, при каких условиях производится повторное выполнение цикла. Во внешнем цикле каждая звезда рассматривается по очереди и компоненты ее ускорения устанавливаются равными нулю. После этого во внутреннем цикле вычисляются силы, дей-

ствующие на каждую звезду со стороны остальных звезд, входящих в скопление.

Предположим, к примеру, что индекс внешнего цикла равен i , а индекс внутреннего цикла — j . Во внутреннем цикле вначале производится проверка, не равен ли индекс i индексу j .

Если индексы оказываются равными, программа не вычисляет силу, поскольку звезда сама себя не притягивает. Во всяком случае, это вычисление привело бы к попытке деления на нуль. (Это, пожалуй, единственная ситуация, в которой я мог бы искренне посочувствовать компьютеру.)

Когда i и j не равны друг другу, программа CLUSTER пользуется формулой евклидова расстояния между звездами: разности координат по осям x , y и z возводятся в квадрат и складываются друг с другом. В результате мы получаем, конечно, квадрат расстояния. Затем производится проверка, не



Четыре звезды кружатся в космическом хороводе в течение нескольких лет и затем покидают сцену

равно ли полученное расстояние нулю. Если да, то нужно дать сигнал тревоги в той или иной форме, потому что компьютеру вскоре придется выполнить операцию деления на нуль. Моя версия программы в таких случаях выдает сообщение «Столкновение!»

Если все в порядке, команды внутреннего цикла завершают вычисление расстояния между звездами, беря квадратный корень из квадрата расстояния, вычисленного ранее. Затем производится деление числа 1000 на квадрат полученного расстояния и в результате этого деления получается значение силы. Наконец, последняя задача, которую нужно решить во внутреннем цикле, — это определить компоненты ускорения i -й звезды. Для этого необходимо суммировать все силы, действующие со стороны других звезд. Например, компонента ускорения i -й звезды по оси x может быть выражена в общем виде следующим образом:

$$ax(i) = ax(i) + f \times (x(j) - x(i))/d.$$

Здесь f и d представляют соответственно силу и расстояние. Отношение проекции расстояния между звездами i и j на ось x к полному расстоянию в точности соответствует составляющей силы, действующей на звезду i вдоль оси x . Компоненты ускорения

звезды вдоль осей y и z вычисляются аналогичным образом.

Завершают программу два цикла, следующие один за другим. В первом осуществляется изменение значения скорости, а во втором — положения. Здесь возникает одна тонкость, на которую обратил мое внимание Дж. Хаббард, математик из Корнеллского университета, чей совет по поводу вычислений, выполняемых над множеством Мандельброта, оказался в высшей степени полезным (см. статью в рубрике «Занимательный компьютер» в журнале «В мире науки», 1985, №10). Дело в том, что можно вычислять координаты положения звезды до вычисления ее скорости, и получающиеся при этом результаты выглядят достаточно правдоподобными. Однако со временем движение звезд станет неестественным, поскольку при таком вычислении координат положения и скоростей звезд будет нарушаться закон сохранения энергии.

В цикле изменения скорости к текущему значению этой переменной просто прибавляется ускорение согласно следующей формуле:

$$vx(i) = vx(i) + ax(i)$$

Здесь предполагается, что временной интервал между двумя последовательными моментами равен единице

времени, через которую выражается скорость. Аналогичные формулы применяются для вычисления составляющих vy и vz . Вычисления координат, выполняемые в последнем цикле, также очень просты:

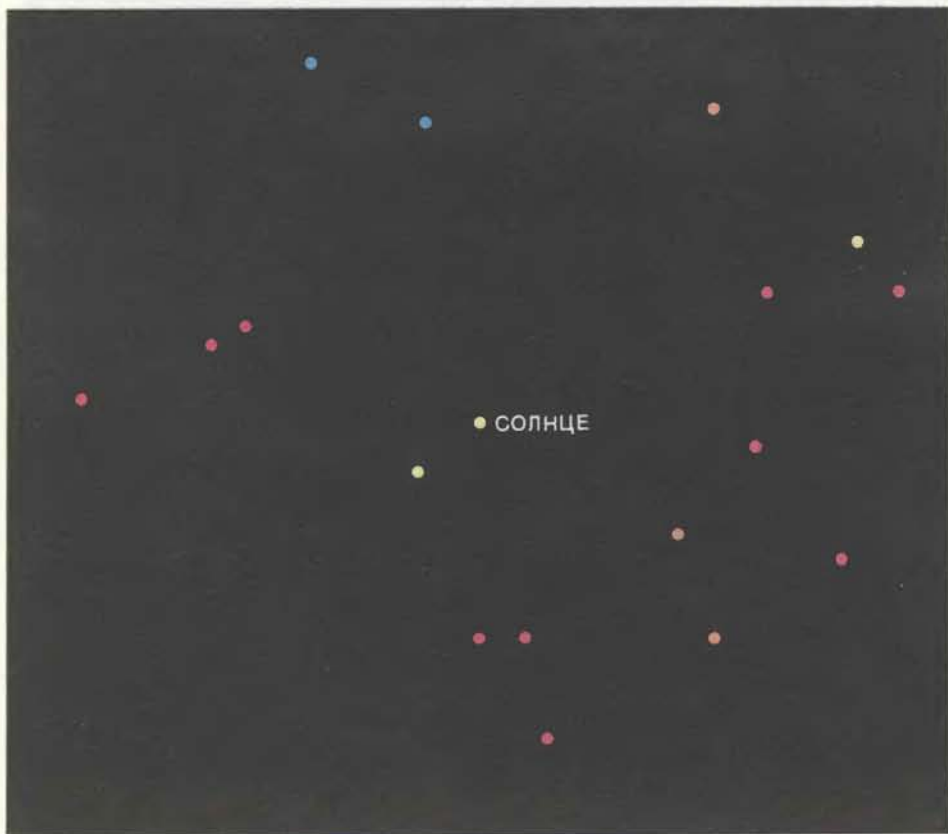
$$x(i) = x(i) + vx(i).$$

Аналогичным образом изменяются элементы массивов y и z . На основе данных, получаемых в последнем цикле, программа CLUSTER определяет положение каждой звезды на двумерной поверхности экрана дисплея. При этом первые две координаты «наносятся» на экран, а третья координата по оси z игнорируется. Таким образом, можно представить себе, что мы наблюдаем скопление через иллюминатор, роль которого играет экран. Значения величин, вычисляемых в программе моделирования скопления, иногда оказываются очень малыми, а иногда и очень большими. По этой причине мы советуем пользоваться арифметическими операциями с двойной точностью так, чтобы округления не нарушали картины.

Время, затрачиваемое программой CLUSTER на один вычислительный цикл, зависит от количества звезд в системе. Системы, насчитывающие около 10 звезд, отличаются интересным (с эстетической точки зрения) поведением, но для того, чтобы достичь реалистичной сложности, количество звезд должно быть порядка 100 или даже 1000. К сожалению, число шагов алгоритма в основном вычислительном цикле возрастает как квадрат числа звезд в скоплении. И хотя специалисты по моделированию звездных систем нашли интересный способ обойти это ограничение, возникает ряд других проблем, осложняющих моделирование.

Наиболее серьезная проблема связана с тем обстоятельством, что мы пытаемся с помощью дискретной модели описать поведение по существу непрерывной системы. Непрерывные гладкие орбиты аппроксимируются последовательностью скачков, траектория которых все дальше удаляется от истинной орбиты, по которой звезда движется в скоплении. Неточности подобного рода можно в какой-то степени скорректировать при наличии статистической регулярности, но когда звезды подходят друг к другу на очень малое расстояние, дискретная модель неестественно и непоправимо усиливает эффекты, связанные с большими гравитационными ускорениями.

Если, например, в ходе выполнения вычислительного цикла одна звезда (Стелла) оказывается в непосред-



Могли бы звезды соседней с нашей галактики образовать звездное скопление?

НАЗВАНИЕ ЗВЕЗДЫ	КООРДИНАТЫ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ			СОСТАВЛЯЮЩИЕ СКОРОСТИ			ЦВЕТ	МАССА
	X	Y	Z	VX	VY	VZ		
СТРУВЕ 2398	68	-365	631	-5,69	4,76	3,35	КРАСНАЯ	0,26
РОСС 248	464	-42	450	-8,75	1,13	-15,45	КРАСНАЯ	0,17
61 ЛЕБЕДЯ	394	-377	433	-2,78	22,03	0,02	ОРАНЖЕВАЯ	0,69
ЛАЛАНД 21185	-404	107	307	7,32	-0,47	-20,11	КРАСНАЯ	0,39
ПРОЦИОН 5	-295	658	68	2,38	0,75	-3,65	ГОЛУБАЯ	1,29
ЗВЕЗДА БАРНАРДА	-7	-371	30	-0,87	24,20	16,78	КРАСНАЯ	0,21
ϵ ЭРИДАНА	408	534	-114	4,60	0,69	-0,50	ОРАНЖЕВАЯ	0,74
ВОЛЬФ 359	-462	136	62	-0,82	9,86	-5,94	КРАСНАЯ	0,10
СИРИУС	-98	514	-157	1,89	-2,21	-2,59	ГОЛУБАЯ	2,96
ЛЕЙТЕН 726-8	487	219	-175	2,08	10,80	-0,41	КРАСНАЯ	0,19
РОСС 128	-683	44	13	2,51	-2,32	-4,09	КРАСНАЯ	0,21
СОЛНЦЕ	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ЖЕЛТАЯ	1,00
γ КИТА	646	307	-208	0,52	-6,62	3,92	ЖЕЛТАЯ	0,85
α ЦЕНТАВРА	-106	-86	-243	-1,95	4,68	4,51	ЖЕЛТАЯ	1,03
ЛЕЙТЕН 789-6	608	-235	-182	-6,75	10,81	10,56	КРАСНАЯ	0,13
ЛЕЙТЕН 725-32	718	227	-233	4,70	6,16	0,51	КРАСНАЯ	0,21
РОСС 154	111	-536	-241	1,79	1,36	0,11	КРАСНАЯ	0,24
ϵ ИНДЕЙЦА	334	-194	-594	-3,54	17,71	2,28	ОРАНЖЕВАЯ	0,69

Параметры всех (за исключением трех) звезд, ближайших соседей Солнечной системы

венной близости от другой звезды (Астер), мощное гравитационное поле резко увеличивает компоненты ускорения обеих звезд. Это увеличение на последующих шагах вычисления распространяется на компоненты скорости, а затем и на координаты положения звезд. На следующей итерации процесса моделирования Стелла оказывается уже очень далеко от Астера и не может «выплатить гравитационного долга». Таким образом возник излишек кинетической энергии. За счет этого эффекта искусственные звездные скопления распадаются быстрее реальных. Есть два пути преодоления указанного затруднения. Первый путь трудный, второй проще. В первом случае необходимо вычислять кеплеровские орбиты для пары близко сошедших звезд. Теоретики предпочитают этот метод прежде всего потому, что формулы, по которым вычисляются орбиты, являются абсолютно точными. Более простой, но иногда неточный метод обработки данных, описывающих ситуации, когда звезды приближаются друг к другу, заключается в том, чтобы уменьшить масштаб шагов по времени в основном вычислительном цикле. Возможно, читатели пожелают взять на вооружение этот прием и воспользоваться им при составлении усовершенствованной версии программы — SUPERCLUSTER.

Программу SUPERCLUSTER можно получить путем несложной модификации программы CLUSTER. В первых, в программе SUPERCLUST-

ER массы звезд, входящих в скопление, могут быть различными. Это изменение можно легко реализовать, введя перед началом выполнения программы значения масс в массив m . Расчет гравитационной силы несколько усложняется: сила уже не является функцией только $1/d^2$, она теперь пропорциональна произведению масс, деленному на d^2 . Кроме того, новая версия программы отличается тем, что звезды подразделяются на спектральные типы. Как и для масс, в программе организуется массив $spec$, элементы которого должны быть заданы перед началом выполнения программы. Однако этот массив используется только в фазе высвечивания звезд на экране после очередной итерации вычислений. Цвет звезд изменяется в пределах от голубого до красного. Зеленый цвет отсутствует. Третье усовершенствование программы CLUSTER состоит в том, что шаг по времени берется произвольным.

В программе SUPERCLUSTER используется переменная $delta$, значение которой равно интервалу между двумя последовательными моментами времени. Эта величина устанавливается перед началом выполнения основных вычислительных циклов. Конечно, эта переменная должна повлиять на формулы, по которым вычисляются изменения как скорости, так и положения звезд: в формуле для скорости на нее множится ускорение, а в формуле для координат на нее множится скорость.

Рассмотрим теперь простой спо-

соб, позволяющий обрабатывать данные, описывающие ситуации, возникающие при сближении звезд. Прежде всего нужно четко установить критерий «близости». Затем в программу нужно ввести проверку, соответствующую выбранному критерию. Проверка должна производиться сразу после вычисления расстояния между двумя звездами. Если зафиксировано «сближение», программа SUPERCLUSTER заменяет значение $delta$, уменьшая ее до одной десятой от ее текущей величины, — по крайней мере до тех пор, пока ни одна пара звезд уже не будет удовлетворять критерию близости. Этот прием, конечно, помогает смягчить внезапные скачки гравитации в дискретной модели. Однако он создает еще более серьезные проблемы, когда звезды по-настоящему близко подходят друг к другу. Если расстояние между звездами уменьшается, скажем, в 10 раз, то гравитационная сила увеличивается в 100 раз! К счастью, опасные сближения случаются довольно редко. Метод уменьшения временного интервала был стандартным средством, которым обычно пользовались специалисты, профессионально занимающиеся моделированием звездных скоплений.

Чтобы программа SUPERCLUSTER давала небесно бессмысленные с астрономической точки зрения результаты, нужно ввести единицы измерения расстояния, массы, а также некоторые другие характеристики физической реальности. В астрономии принята

удобная мера расстояния, называемая астрономической единицей (АЕ) и соответствующая среднему расстоянию от Земли до Солнца. Массу можно измерять, приняв за единицу массу Солнца, а время лучше всего измерять в годах. При этих условиях универсальная постоянная гравитационного притяжения будет приблизительно равна 39. В программе SUPERCLUSTER используется именно это значение в отличие от 1000, принятого в программе CLUSTER.

Теперь все готово к тому, чтобы запустить любую из рассмотренных нами программ. В качестве предварительного упражнения для программы CLUSTER можно взять четыре звезды. Расположим их по вершинам квадрата, размер которого на экране был бы 3—5 см. Помимо координат x и y , соответствующих плоскости экрана, для каждой звезды следует задать также, вообще говоря, ненулевое значение координаты z . В противном случае пространство, в котором движутся звезды, будет ограничено плоскостью и сближения между ними будут наблюдаться намного чаще. Компоненты скоростей должны быть небольшими (скажем, в пределах от -5

до $+5$), а направление скоростей должно быть выбрано так, чтобы звезды двигались по часовой стрелке по замкнутым траекториям.

Программу SUPERCLUSTER можно попробовать в действии на звездной системе, изображенной на рисунке на с. 92. Эта система образована звездами, являющимися ближайшими соседями Солнечной системы в нашей Галактике. Что случилось бы, если бы Солнце и несколько соседних с ним звезд были отрезаны (в гравитационном смысле) от остальной части Галактики и предоставлены сами себе на неограниченное время? Каким было бы движение звезд? Образовали бы они звездное скопление или рассеялись? Этот вопрос может иметь, а может и не иметь научного значения, однако сам по себе он интересен. Кроме того, точные координаты и скорости известны нам лишь для нескольких ближайших звезд (см. таблицу на с. 93).

Звездные скопления бывают либо открытыми (рассеянными), либо шаровыми. Открытые скопления насчитывают несколько тысяч звезд, в то время как число звезд в шаровых скоплениях может достигать несколь-

ких миллионов. Пока исследователи, среди которых можно назвать и Дж. Джернигена, работающего в Калифорнийском университете в Беркли, ограничивались моделированием лишь открытых звездных скоплений и не очень многочисленных. Шаровые скопления пока остаются неприступными. Тем не менее Джерниген и некоторые другие пионеры моделирования, например такие, как Аарсет также из Калифорнийского университета в Беркли, уже на протяжении десятилетий наблюдают коллапсы звездных скоплений, моделируемых на ЭВМ. В качестве количественной характеристики коллапса рассматривается сферический объем, занимающий центральную часть скопления и содержащий в себе 10% его полной массы. Радиус этой сферы называют десятипроцентным радиусом. Явление коллапса начинается, когда десятипроцентный радиус уменьшается со временем. При этом центральная часть скопления неизбежно становится все плотнее и плотнее. Но, поскольку моделируемые звезды являются математическими точками, в таких звездных скоплениях никогда не происходит ничего страшного. В них не возникает никаких черных дыр. Это подтверждают и теоретики, занимающиеся моделированием звездных скоплений. У нас также пока мало свидетельств тому, что подобные ярко выраженные коллапсы случаются и в реальных скоплениях звезд. Какие-то факторы, по-видимому, мешают возникновению коллапса.

Как традиционные, так и современные эксперименты по моделированию звездных скоплений могут дать ключ к этой загадке. Во многих случаях начинающийся коллапс центральной части скопления фактически останавливался несколькими двойными звездными системами, расположенными в центре моделируемого скопления. В одном из экспериментов Джернигена достаточным для этого, по-видимому, оказалось присутствие лишь одной такой системы. Как это можно объяснить? По мнению аспиранта Д. Портера, работающего под руководством Джернигена, объяснение может заключаться в том, что «очень плотные двойные звездные системы вращаются с такой колоссальной скоростью, что отталкивают приближающиеся к ним звезды по касательной, и последние либо вращаются по круговым орбитам вокруг центра скопления, либо даже возвращаются в область меньшей плотности, окружающую ядро скопления и называемую короной. Это, наверное, и есть тот механизм, который пред-



Шаровое звездное скопление Мессье 13 в созвездии Геркулеса

отвращает чрезмерное уплотнение ядра скопления».

В свое время Джерниген занимался наблюдением звезд — источников рентгеновского излучения. Когда его исследования сконцентрировались на поисках источников рентгеновского излучения в звездных скоплениях, он стал все больше интересоваться природой звездных скоплений как таковых. Моделирование показалось ему эффективным средством исследования.

Джерниген внес важный вклад в технику моделирования, повышающий его эффективность. В программе CLUSTER и других подобных программах один вычислительный цикл для n звезд требует n^2 шагов вычисления. Цикл Джернигена требует лишь $n \times \log n$ шагов. Он разбивает моделируемое скопление на пары соседних звезд. Затем каждая такая пара заменяется некоторой фиктивной массой и скоростью, описывающими результирующее поведение пары. Затем тот же процесс применяется уже к парам звезд так, как если бы они были отдельными звездами. По мере того как развивается этот процесс разбиения на пары, возникают все новые узлы масс в структуре данных, называемой деревом. При этом корневой узел дерева представляет уже все скопление звезд. Теперь можно вычислить характеристики движения как для центрального узла, так и для всех ветвей дерева, вплоть до индивидуальных звезд.

Принадлежит ли будущее этому методу? По мнению самого Джернигена, он определенно помогает ускорить вычисления. Однако будущие поколения программ, моделирующих звездные скопления, скорее всего будут основаны на гибридном методе, применяемом А. Лайтменом из Астрофизического центра обсерватории Гарвардского колледжа и Астрофизической обсерватории Смитсона, а также С. Макмилланом из Иллинойского университета в Урбана-Шампейне. Согласно их методу, к звездам ядра скопления применяется непосредственно моделирование, описанное выше, а к звездам, находящимся вне ядра, применяются статистические методы моделирования так как если бы они представляли собой газ.

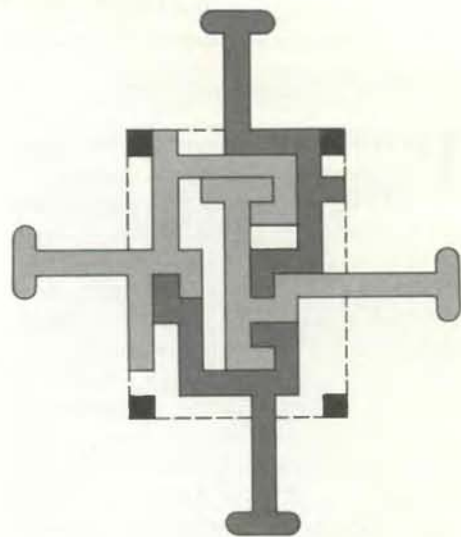
Читателям, владеющим языком программирования АПЛ, будет интересно познакомиться с новой публикацией Г. Чейтина из Исследовательского центра Т. Уотсона фирмы IBM в Йорктаун-Хайтсе (шт. Нью-Йорк). Она называется «An APL2 Gallery of Mathematical Physics» («Галерея математической физики на АПЛ-2») и представляет собой брошюру на 56

страницах, в которой приведены объяснения пяти важнейших физических теорий, включая как ньютоновское, так и релятивистское движение тел в космическом пространстве. Каждая рассмотренная теория иллюстрируется распечатками компьютерных программ, написанных на языке АПЛ.

В ДЕКАБРЬСКОМ номере журнала за прошлый год в этой рубрике разговор шел о трех головоломках: «колючке» Билла, «роге избытия» Коффина и игрушке-вертушке Энджела. Головоломки заинтересовали сотни читателей: одни пытались найти магический способ, как разобрать хитроумно сочленяющиеся детали в «колючке» Билла, другие сосредоточили свое внимание на поиске решения задачи о размещении фишек полимино. Представители одной группы не могут помочь представителям другой: каждая из головоломок уникальна. Еще одна группа читателей без устали продолжает крутить колеса игрушки Энджела, тщетно пытаясь установить их в требуемом положении. Некоторым энтузиастам удалось добиться успеха, по крайней мере на абстрактном уровне. Уже начали поступать письма, в которых предлагается решение задачи.

Пришло также несколько писем с описанием конструкций двумерных «колючек» — игрушек, которые нужно разобрать на составляющие их детали. Наиболее изящная из предложенных читателями конструкций показана на рисунке вверху. Задача заключается в том, чтобы удалить четыре составляющие игрушку детали с прямоугольного подноса, границы которого изображены пунктирными линиями. Детали можно перемещать только в четырех направлениях в плоскости рисунка: вверх, вниз, влево и вправо. Четыре темных квадрата в углах считаются жестко прикрепленными к подносу. Какую из деталей следует переместить первой? Эту двумерную головоломку придумал Дж. Картер из Литтлтона (шт. Колорадо). Имея дело с трехмерной игрушкой, мы по крайней мере можем ее повернуть в руках и осмотреть со всех сторон. Толкать и тянуть детали, находящиеся в плоском ящике, как-то непривычно.

Р. Клавье из Далласа (шт. Техас) сообщил, что ему удалось найти алгоритмическое решение задачи Энджела. Он пишет, что его программа, написанная на Бейсике и выполняющаяся на портативном компьютере модели CC-40 фирмы Texas Instruments, на решение задачи обычно затрачивает от 300 до 700 ходов. В алго-



Двумерная головоломка-колючка
Дж. Картера

ритме используется шесть стандартных обменных операций между камнями и костями. Читатели, воспользовавшиеся предложенным мною способом представления последовательности, возможно, закинули свою сеть слишком широко. Решение, полученное для числовой последовательности, не всегда оказывается решением задачи. Формулируя свое предложение, я отдавал себе отчет в том, что в этом представлении не участвуют кости. «Ну, и ладно, — сказал я себе, — позаботимся о камнях, а кости позаботятся о себе сами». Оказалось, что я был неправ. Камни должны перемежаться с символами, представляющими кости.

Чрезвычайно сложную головоломку подобного типа изобрел Р. Карлсон из Лос-Альтоса (шт. Калифорния). Ее настолько трудно изготовить, что пока он вынужден удовлетвориться только ее изображением на экране дисплея. Головоломка представляет собой икосаэдр, геометрическое тело, имеющее 20 треугольных граней. Каждая вершина может стать осью вращения при перемещивании граней. При повороте вершины вместе с ней поворачиваются пять прилегающих к ней треугольников. Каждый треугольник имеет три зоны разного цвета. В исходном упорядоченном положении к каждой вершине прилегают зоны одного цвета, Карлсон подготовил версию своей головоломки для персонального компьютера РС фирмы IBM. В дополнение к цветовому оформлению каждое перемещение сопровождается музыкальной нотой.

Наука и общество

Ученые бойкотируют

РУКОВОДИТЕЛИ программы стратегической оборонной инициативы (СОИ), известной под названием программы «звездных войн», с самого начала понимали, что создание щита против баллистических ракет противника в основном должно основываться на результатах фундаментальных исследований, выполняемых в научных лабораториях университетов. По инициативе руководителей СОИ было создано Управление по новым научно-техническим достижениям (УННТД), которое в следующем пятилетии планирует израсходовать на исследования около 600 млн. долл., причем большую часть этой суммы предусмотрено выделить университетам. По словам директора УННТД Дж. Йонсона, эти средства будут направлены на целевые исследовательские работы в тех областях, которые имеют непосредственное отношение к программе СОИ, а именно в области лазерной техники, кибернетики и информатики, материаловедения и физики плазмы.

В ответ на объявленный в марте 1985 г. призыв УННТД принять участие в проведении исследований поступило множество предложений. К июню прошлого года их число уже составило около 3000 и сотрудники примерно 60 университетов к тому времени уже приступили к работам по контрактам, финансируемым из средств СОИ. В то же время многие специалисты, профессиональный опыт которых мог бы оказаться полезным в осуществлении программы «звездных войн», публично отказываются от участия в ней. К ноябрю 1985 г. представители почти 90 университетов — более 1600 научных сотрудников и около 1200 аспирантов, специализирующихся в областях, к которым относятся проблемы, решаемые в рамках программы СОИ, — подписали заявления, в которых назвали программу «звездных войн» неосуществимой и стратегически ошибочной. Кроме того, они заявили, что откажутся от денег из средств, отпущенных на программу.

Как указал Дж. Когут, профессор физики Иллинойского университета в Урбана-Шампейне, возглавивший бойкот ученых в своем университете, 58% профессорско-преподавательского состава 14 кафедр физического факультета подписали подобные заявления; с отказами от участия в работах по программе СОИ выступили и такие университеты, как Принстон-

ский (где заявления об отказе подписали 75% ученых-физиков), Иллинойский (74%), Корнеллский (69%), Калифорнийский технологический институт (60%), Гарвардский университет (49%) и Массачусетский технологический институт (38%). Хотя инициаторами этой кампании, начавшейся весной прошлого года в Иллинойском и Корнеллском университетах были физики, ее широко поддерживали ученые других областей науки. По словам З. Уорхафта, доцента технического факультета Корнеллского университета, заявление об отказе участвовать в работах по программе СОИ, распространенное в их университете, подписали 75% ученых факультета астрономии, 46% ученых химического и 44% технического факультетов.

Эти ученые руководствуются не только стремлением предотвратить «звездные войны», но и тем, что, по их мнению, финансирование из средств СОИ может ограничить свободу научной деятельности. Йонсон заверяет, что деньги, которые поступят в университеты из фонда СОИ на проведение открытых (несекретных) исследований, не будут служить ограничивающим фактором. Однако неопределенности, содержащиеся в последних политических заявлениях руководителей СОИ и представителей Белого дома, беспокоят организаторов бойкота. Они опасаются, что гриф секретности со временем (по мере того как в процессе работы будут получаться значимые с военной точки зрения результаты) может быть наложен на те исследовательские работы, которые первоначально считались открытыми. Даже если исследования и не будут засекречены, как полагают организаторы бойкота, правительство, возможно, будет пытаться наложить ограничения на обмен результатами исследований, ужесточив контроль за их «экспортом», что ограничит доступ к информации иностранных ученых, работающих в США. Йонсон называет эти опасения необоснованными и уверяет, что возглавляемое им управление попытается дать гарантии, что всякая открытая работа, финансируемая из фонда СОИ, в дальнейшем не будет контролироваться.

Другое возражение основано на том, что получаемые из фонда СОИ деньги вместе с теми, которые в последнее время дополнительно выделены министерством обороны на научные исследования, могут поставить значительное число проводимых в

университетах исследований в зависимости от единственного источника финансирования, а это означает зависимость от политической ситуации в мире. Те, кто поставил свои подписи под заявлениями об отказе участвовать в работах по программе СОИ, также выражают озабоченность по поводу того, что в будущем реализация этой программы может вызвать отток значительного числа талантливых ученых из тех научных направлений, которые, по их мнению, США должны развивать, чтобы сохранить свои прочные позиции в экономике и науке.

Цель объявленного учеными бойкота состоит в следующем: его организаторы хотят показать общественности и конгрессу, что имеется немало ученых, которые настроены против программы СОИ и сомневаются в возможности ее осуществления. Они опасаются, что получение университетами денег из фонда СОИ на проведение научно-исследовательских работ может привести к усилению поддержки проекта «звездных войн» со стороны ученых университетов за счет увеличения числа зависимых, а стало быть, молчаливо соглашающихся сторонников этой программы. Когут указывает, что некоторые области науки, как, например, оптика, которые будут финансироваться довольно щедро, до недавнего времени испытывали большой недостаток в средствах.

Какой бы сильный политический резонанс ни вызвал этот бойкот, проводимая кампания, пожалуй, уже повлияла на снижение числа организаций, готовых работать на средства из фонда СОИ. Уорхафт считает, что в Корнеллском университете, ученые которого представили в УННТД предварительный перечень, насчитывающий лишь около дюжины тем для разработки (так называемые белые документы), «обсуждение и горячие споры», порожденные этим движением, заставили многих ученых пересмотреть свое отношение к программе. «Я думаю, — сказал Уорхафт, — что имеющие хорошую репутацию научные организации не собираются принимать участие» в осуществлении исследовательской программы СОИ.

Йонсон утверждает, что он располагает большим числом заслуживающих внимание предложений, чем он может финансировать; он говорит, что бойкот действительно снизит готовность ученых внести свой вклад в исследования по программе СОИ, но в незначительной степени. Предмет его особого беспокойства, как признает он сам, заключается в том, что подобные бойкоты открытых фунда-

ментальных научных исследований сами по себе являются посягательством на свободу научной деятельности, поскольку они оказывают политическое давление на ученых и заставляют их отказываться от участия в научных исследованиях.

Мнения расходятся

НЕМНОГИМ более года назад кристаллографы и физики-твёрдотельщики столкнулись с не известной до сих пор «квазикристаллической» формой упорядочения вещества. В отличие от кристалла она не может быть описана с помощью периодической решетки, но имеет дальний ориентационный порядок в отличие от аморфных тел.

В дискуссии о природе нового состояния неожиданное предложение внес Лайнус Полинг. Он заявил, что данные, на которых основывается гипотеза о существовании новой фазы, можно объяснить без привлечения предположения о квазикристалле, с помощью хорошо известного кристаллографического явления, называемого направленным двойникованием (при котором несколько одинаковых кристаллов растут вдоль общих граней).

Первое экспериментальное доказательство существования квазикристалла было получено методом электронной дифракции и опубликовано в ноябре 1984 г. в журнале «Physical Review Letters» Д. Шехтманом из Израильского технического института (Technion) и его коллегами из Французского национального центра научных исследований и Национального бюро стандартов США (NBS). Дифракционная картина, полученная при рассеянии электронного пучка на быстро охлажденном сплаве алюминия и марганца определенного состава, имела ось симметрии пятого порядка, другими словами, она совмещалась сама с собой при повороте на $1/5$ часть полной окружности. Это был неожиданный результат, так как элементарная теорема кристаллографии утверждает, что подобно тому, как нельзя «замостить» плоскость пятиугольниками, кристалл, составленный из элементарных, периодически повторяющихся единиц, не может иметь вращательную симметрию пятого порядка. Открытие веществ с такими необычными свойствами побудило многих исследователей к поиску других квазикристаллов, а также структур, делающих возможным их существование.

В обычном кристалле атомы распо-

ложены регулярно на параллельных плоскостях. Расстояние между плоскостями определяется простой периодической функцией. Через каждый атом можно провести бесконечное число плоскостей, каждая из которых принадлежит некоторому семейству параллельных плоскостей. В большинстве предложенных квазикристаллических структур, как и в нормальных кристаллах, атомы тоже лежат на параллельных плоскостях. Ряды плоскостей пересекаются друг с другом под углом 108° (это угол между соседними сторонами правильного пятиугольника). Таким образом, расположение самих плоскостей соответствует симметрии пятого порядка: если квазикристалл повернуть на $1/5$ полной окружности, то каждый ряд плоскостей займет положение, ранее занимаемое другим рядом. Однако, чтобы такая симметрия была возможна, атомы должны быть расположены на плоскостях нерегулярно и расстояние между соседними плоскостями должно меняться непериодически. При этом неясен способ описания квазикристалла, дающий положение каждого атома.

Дж. Кан из Национального бюро стандартов США, один из соавторов Шехтмана, заметил: «В кристаллографии можно сказать: «Вот нечто похожее на элементарную ячейку; повторите ее, и вы получите кристалл». Но что же надо сказать о квазикристаллической структуре, чтобы определить ее однозначно?»

В августе 1985 г. на заседании по теме «применимая и неприменимая кристаллография» конференции Американской кристаллографической ассоциации, Полинг высказал возражение по поводу необходимости рассматривать столь экзотические структуры. В докладе, переработанный вариант которого недавно опубликован в журнале «Nature», он отметил, что такую же симметрию пятого порядка можно получить двойникованием 20 одинаковых кристаллов, совместно растущих из одной точки.

В модели Полинга каждый кристалл растёт в виде «сжатого» тетраэдра: «приземистой» пирамиды с треугольным основанием. Все 20 пирамид направлены вершинами в сторону центра. Каждый кристалл подогнан к соседним пирамидам таким образом, что их основания, смыкаясь, образуют правильный икосаэдр (двадцатигранник, все грани которого — треугольники). Икосаэдр имеет симметрию пятого порядка: в каждой из его 12 вершин сходится по пять треугольных граней. Двадцать кристаллов, двойникоющихся таким образом, будут давать дифракционную

картину, имеющую симметрию пятого порядка: каждый отдельный кристалл будет давать свою дифракционную картину и их суперпозиция будет обладать полной симметрией икосаэдра.

Полинг определил структуру решетки кристалла алюминий — марганец, который мог бы расти подобным образом. Кристалл, напоминающий структуры, впервые открытые в начале 50-х годов, имеет кубическую элементарную ячейку с длиной ребра $26,7 \text{ \AA}$. Полинг проверил свою модель на рентгенограмме порошкового образца (картине, получающейся при прохождении пучка рентгеновского излучения через тонкий порошок сплава алюминий — марганец), переданной ему Шехтманом. Такая рентгенограмма дает информацию о кристаллической решетке, но не об относительной ориентации различных кристаллов в образце. Полинг заключил, что он нашел правильную структуру, так как его модель, построенная без помощи дифракционной картины, очень хорошо ей соответствует. По его оценке, «вероятность случайного совпадения заведомо меньше 1 из 1000».

Однако ученые, пытающиеся определить структуру квазикристаллов, утверждают, что гипотеза о двойниковании не совпадает со всеми имеющимися данными. Действительно, Кан напомнил: «Когда Шехтман впервые показал мне дифракционную картину, я сказал: «Ну уж Дэни, это точно двойникование». Поэтому мы и задержали публикацию новых данных более чем на два года, занимаясь исключением обычных кристаллографических объяснений». Кан и другие физики-твёрдотельщики, включая Д. Нелсона из Гарвардского университета, считают, что результаты, полученные с помощью методов микродифракции и электронной микроскопии высокого разрешения, исключают гипотезу Полинга.

Дифракционная картина при микродифракции образуется от участка диаметром меньше 100 \AA . Такие картины могут быть получены при различных положениях образца сплава алюминий — марганец; при этом каждая из них, соответствующая данному углу падения пучка электронов, проявляет симметрию пятого порядка независимо от места прохождения пучка. По мнению Кана, если бы эти вещества состояли из «двойников», то не все дифракционные картины включали бы каждый из двойникоющихся кристаллов; некоторые из них содержали бы вклад от дифракции лишь на малой части кристаллов, не проявляя симметрии пятого порядка.

Микроскопия высокого разрешения позволяет получать детали размером примерно 2 \AA . Элементарная кубическая ячейка в модели Полинга, имеющая ребро размером $26,7 \text{ \AA}$, должна была бы отчетливо наблюдаться. Но ни на одной микрофотографии высокого разрешения этого сплава не обнаруживаются элементарных ячеек или картины роста, характерной для двойникоющихся кристаллов. В настоящее время Полинг готовится к публикации результатов своего анализа микрофотографии высокого разрешения.

Правовые аспекты развития средств связи

КАК отмечается в докладе Управления научно-технической оценки (УНТО) при американском конгрессе, темпы развития современной техники связи настолько быстры, что за ними не поспевают законы, защищающие права человека на невмешательство в его личную жизнь. Управление считает, что конгресс должен рассмотреть этот вопрос и привести в соответствие права граждан и ответственность правительства за поддержание общественной безопасности.

Всего лишь 20 лет назад, как указывается в докладе, использование электронных устройств с целью контроля поведения отдельных людей ограничивалось подслушиванием телефонных разговоров и установкой скрытых микрофонов — неотъемлемого атрибута персонажей детективных романов — шпионов и полицейских. С тех пор техника электронного слежения за человеком шагнула далеко вперед. Теперь имеются такие устройства, которые способны следить за передвижением людей, за их действиями, «подглядывать», что они пишут, и «подслушивать», что говорят, даже если эти люди находятся дома за закрытыми дверями и за опущенными шторами. Так, чувствительный микрофон, закрепленный на внешней стороне окна, может улавливать и записывать разговор, происходящий в комнате; более того, заинтересованному лицу совсем не обязательно прослушивать всю запись, ему достаточно ввести ее в компьютер, и с помощью специальной программы из записи будет «выужена» вся нужная информация.

Имеется и такая аппаратура, которая может записать на видеоленту все, что человек делает дома или на работе; его передвижение на улице в вечернее и ночное время может зафиксировать камера, приспособленная для работы в темноте; поездку на ав-

томобиле может проследить датчик, прикрепленный к машине и излучающий сигнал; электронные средства могут записать телефонные номера, которые человек набирает на своем аппарате, а также считать хранящиеся в компьютере данные о его счете в банке.

Проведенный УНТО анализ показал, что помимо Центрального разведывательного управления, Разведывательного управления министерства обороны и Управления национальной безопасности (в анализе не учитывалась деятельность, связанная с секретной информацией) 35 из 142 обследованных федеральных управлений используют или намереваются использовать в своей практике электронные следящие устройства. Наиболее распространенными из них являются скрытые телевизионные камеры, системы ночного видения, миниатюрные передатчики и специальные устройства, регистрирующие номера телефонов, набирающиеся на находящемся под контролем аппарате. Операции по слежению включают перехват радиопередач, контроль за работой вычислительных машин, а также подслушивание или перехват сообщений, передаваемых электронными средствами. Во многих случаях указанные управления практикуют слежение, заручившись только согласием на то судебных органов, но закон не требует даже и этого. Наиболее близкий к рассматриваемому аспекту закон — это раздел III принятого в 1968 г. «Всестороннего закона о предотвращении преступлений и обеспечении безопасности на улицах», который запрещает подключение к проводным линиям, по которым передаются устные сообщения.

УНТО заявило, что у конгресса есть две возможности. Одна из них — это не предпринимать никаких мер, и в таком случае состояние рассматриваемого вопроса будет определяться действиями чиновников различных ведомств и частными решениями судебных органов. В результате сохранится «продолжающаяся неопределенность и неразбериха в отношении права на невмешательство в личные телефонные разговоры, в передаваемые с помощью электронных средств почтовые отправления, в линии передачи данных и т. п.». Другая возможность заключается в том, чтобы «включить операции, которые способны выполнять современные электронные средства, в сферу действия раздела III». С этой целью в сенат и палату представителей был представлен на рассмотрение «Закон 1985 г. о тайне связи, осуществляемой с помощью электронных средств».

Издательство МИР предлагает:

Ф. Хелзен, А. Мартин КВАРКИ И ЛЕПТОНЫ. ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЧАСТИЦ

Перевод с английского

Книга представляет собой введение в теорию кварков и лептонов, написанное на современном уровне с учетом самых последних достижений физики элементарных частиц. Она заполняет пробел в отечественной литературе по физике элементарных частиц для читателей среднего уровня подготовки по квантовой и релятивистской физике, имеющих предварительное знакомство лишь с основами нерелятивистской квантовой механики и специальной теории относительности.

После вступительного обзора основных свойств частиц обсуждаются свойства симметрии и вводится кварковая модель адронов. Далее вводится понятие об античастицах и обсуждаются проблемы электродинамики скалярных и спинорных частиц. Последующие главы содержат более глубокое обоснование кварковой структуры адронов, понятия партонных и основные идеи квантовой хромодинамики. Заключительные главы посвящены слабым и электрослабым взаимодействиям, идеям калибровочной симметрии и модели Вайнберга—Салама.

Для студентов и аспирантов физиков (как теоретиков, так и экспериментаторов).

1987, 25 л. Цена 3 р.80 к.

Предварительные заказы на книги выпуска 1987 г. принимаются магазинами научно-технической литературы с апреля-мая 1986 года.



Издательство
МИР
предлагает:

**ХИМИЧЕСКИЕ
ПРИЛОЖЕНИЯ
ТОПОЛОГИИ
И ТЕОРИИ ГРАФОВ**

Под редакцией Р. Кинга
Перевод с английского

Рассматривается применение математического аппарата для описания молекулярных структур в современной теоретической органической химии. Отраженная в книге область топологического анализа охватывает теорию молекулярных структур, стереохимию, химию полимеров и кластеров, комплексных соединений, свойств и путей превращения молекул химических соединений.

Из отзыва профессора В.И. Минкина: «Основной целью издания является знакомство, стимулирование понимания и использования химиками новых математических методов ... Углубление содержания представлений современной химии, их систематизация требует применения новых подходов, в частности топологии и теории графов».

Содержание: Квантовая химия — теория молекулярной структуры, основанная на топологических свойствах распределения заряда в молекулярных системах. Топологический анализ поверхности потенциальной энергии и путей химической реакции. Топологические индексы реакционной способности. Классификация механизмов химических реакций. Стереохимия. Неорганическая химия кластеров. Химия полимеров. Биохимия. Теория растворов.

Для научных работников в области квантовой, физической, неорганической химии, биохимии, химии полимеров; для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

1987, 38 л. Цена 6 р.

Предварительные заказы на книгу выпуска 1987 г. принимаются магазинами научно-технической литературы с апреля-мая 1986 года.



**КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ,
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
И КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ**

MISSION TO EARTH: LANDSAT VIEWS THE WORLD. Nicholas M. Short, Paul D. Lowman, Jr., Stanley C. Freden and William A. Finch, Jr. NASA SP-360, U.S. Government Printing Office, 1976.

SPACE SCIENCE COMES OF AGE: PERSPECTIVES IN THE HISTORY OF THE SPACE SCIENCES. Edited by Paul A. Hanle and Von Del Chamberlain. National Air and Space Museum, Smithsonian Institution Press, 1981.

SPACE RESEARCH IN THE ERA OF THE SPACE STATION. Kenneth J. Frost and Frank B. McDonald in *Science*, Vol. 226, No. 4681, pages 1381-1385; December 21, 1984.

ASTROPHYSICS TODAY. Edited by A. G. W. Cameron. American Institute of Physics, 1985.

Коллектив авторов. КОСМОНАВИКА СССР. — М.: Машиностроение, 1986.

**ОСТАНОВКА
ЗЛОКАЧЕСТВЕННОГО РОСТА
ПУТЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ
ДИФФЕРЕНЦИРОВКИ КЛЕТОК**

ERYTHROLEUKEMIC DIFFERENTIATION. Paul A. Marks and Richard A. Rifkind in *Annual Review of Biochemistry*, Vol. 47, pages 419-448; 1978.

CONTROL OF NORMAL CELL DIFFERENTIATION AND THE PHENOTYPIC REVERSION OF MALIGNANCY IN MYELOID LEUKEMIA. Leo Sachs in *Nature*, Vol. 274, No. 5671, pages 535-539; August 10, 1978.

CONSTITUTIVE UNCOUPLING OF PATHWAYS OF GENE EXPRESSION THAT CONTROL GROWTH AND DIFFERENTIATION IN MYELOID LEUKEMIA: A MODEL FOR THE ORIGIN AND PROGRESSION OF MALIGNANCY. Leo Sachs in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 77, No. 10, pages 6152-6156; October, 1980.

NORMAL DEVELOPMENTAL PROGRAMMES IN MYELOID LEUKEMIA: REGULATORY PROTEINS IN THE CONTROL OF GROWTH AND DIFFERENTIATION. Leo Sachs in *Cancer Surveys*, Vol. 1, No. 2, pages 321-342; 1982.

**СТРУКТУРА
ХВОСТОВ КОМЕТ**

INTERPLANETARY GAS. XXIII. PLASMA TAIL DISCONNECTION EVENTS IN COMETS: EVIDENCE FOR MAGNETIC FIELD LINE RECONNECTION AT INTERPLANETARY SECTOR BOUNDARIES? M. B. Niedner, Jr., and J. C. Brandt in *The Astrophysical Journal*, Vol. 223, No. 2, pages 655-670; July 15, 1978.

STRUCTURES FAR FROM THE HEAD OF COMET KOHOUTEK, II: A DISCUSSION OF THE SWAN CLOUD OF JANUARY 11 AND OF THE GENERAL MORPHOLOGY OF COMETARY PLASMA TAILS. Malcolm B. Niedner, Jr., and John C. Brandt in *Icarus*, Vol. 42, No. 2, pages 257-270; May, 1980.

THE COMET BOOK. Robert D. Chapman and John C. Brandt. Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1984.

Колдер Н. КОМЕТА НАДВИГАЕТСЯ. Перев. с англ. — М.: Мир, 1984.

Марочник Л. С. СВИДАНИЕ С КОМЕТОЙ. — М.: Наука, 1985.

**ПРИМЕНЕНИЯ
ОБРАЩЕНИЯ
ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

NONLINEAR OPTICAL PHASE CONJUGATION. Special issue of *Optical Engineering*, Vol. 21, No. 2; March/April, 1982.

OPTICAL PHASE CONJUGATION. Edited by R. A. Fisher. Academic Press, 1983.

NONLINEAR OPTICAL PHASE CONJUGATION. David M. Pepper in *The Laser Handbook*: Vol. 4, edited by M. L. Stitch and M. Bass. North-Holland Publishing Co., 1985.

PRINCIPLES OF PHASE CONJUGATION. B. Ya. Zel'dovich, N. F. Pilipetsky and V. V. Shkunov. Springer-Verlag, 1985.

Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА. — В мире науки, 1986, № 2, с. 16-23.

Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАССЕЯНИИ. — Успехи физических наук, 1982, т. 138, с. 249.

Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА. — М.: Наука, 1985.

ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ. Под ред. В. И. Беспалова. — Горький: Издательство ИПФ АН СССР, 1982.

Издательство
МИР
предлагает:

ХРОМАТОГРАФИЯ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА

В двух частях.

Под редакцией Э. Хефтмана
Перевод с английского

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

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

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

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

1986, 54 л. Цена комплекта 3 р.60 к.



ОБРАЗОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКОВ НА ДНЕ ОКЕАНА

HYDROTHERMAL PROCESSES AT SEAFLOOR SPREADING CENTERS. Edited by Peter A. Rona, Kurt Boström, Lucien Laubier and Kenneth L. Smith, Jr. NATO Conference Series, IV Marine Sciences, Vol. 12, Plenum Press, 1983.

HOT SPRINGS ON THE OCEAN FLOOR. John M. Edmond and Karen Von Damm in *Scientific American*, Vol. 248, No. 4, pages 70-85; April, 1983.

Гурвич Е.Г., Богданов Ю.А., Лищин А.П. ТИПЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ДНЕ ОКЕАНА И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ. В сборнике «Эволюция осадочного рудообразования в истории Земли». — М.: Наука, 1984.

ХИМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ У ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

HERBIVORES: THEIR INTERACTIONS WITH SECONDARY PLANT METABOLITES. Edited by Gerald A. Rosenthal and Daniel H. Janzen. Academic Press, 1979.

CHEMICAL ECOLOGY OF INSECTS. Edited by William J. Bell and Ring R. Cardé. Sinauer Associates, Inc., 1984.

INSECTS ON PLANTS. D. R. Strong, J. H. Lawton and R. Southwood. Harvard University Press, 1984.

Барбье М. ВВЕДЕНИЕ В ХИМИЧЕСКУЮ ЭКОЛОГИЮ. — М.: Мир, 1978.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАДИОУГЛЕРОДНОЙ ДАТИРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРИТЕЛЯ

WORKING WITH RADIOCARBON DATES. H. T. Waterbolk in *Proceedings of the Prehistoric Society*, Vol. 37, Part 2, pages 15-33; December, 1971.

RADIOISOTOPE CLOCKS IN ARCHAEOLOGY. R. E. M. Hedges in *Nature*, Vol. 281, No. 5725, pages 19-24; September 6, 1979.

PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL RADIOCARBON CONFERENCE — SEATTLE. In *Radiocarbon*, Vol. 25, No. 2; 1983.

КАК ГОЛОВАСТИКИ УЗНАЮТ РОДСТВЕННИКОВ

GENETIC CONTROL FOR SIBLING RECOGNITION? Andrew R. Blaustein and Richard K. O'Hara in *Nature*, Vol. 290; No. 5803, pages 246-248; March 9, 1981.

RANA CASCADAE TADPOLES AGGREGATE WITH SIBLINGS: AN EXPERIMENTAL FIELD STUDY. Richard K. O'Hara and Andrew R. Blaustein in

Oecologia; Vol. 67, No. 1, pages 44-51; 1985.

KIN RECOGNITION IN ANIMALS. Edited by David J.C. Fletcher and Charles D. Michener. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

НАУКА ВОКРУГ НАС

OPTICAL METHODS OF CHEMICAL ANALYSIS. Thomas R. P. Gibb, Jr. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1942.

FUNDAMENTALS OF OPTICS. Francis A. Jenkins and Harvey E. White. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

AN APL2 GALLERY OF MATHEMATICAL PHYSICS — A COURSE OUTLINE. Gregory J. Chaitin, IBM Research, P. O. Box 218, Yorktown Heights, N. Y. 10598; 1985.

DIRECT N-BODY CALCULATIONS. Sverre J. Aarseth in *Dynamics of Star Clusters*, edited by Jeremy Goodman and Piet Hut. D. Reidel Publishing Company, 1985.

A UNIFIED N-BODY AND STATISTICAL TREATMENT OF STELLAR DYNAMICS. Alan P. Lightman and Stephen L. W. McMillan in *Dynamics of Star Clusters*, edited by Jeremy Goodman and Piet Hut. D. Reidel Publishing Company, 1985.

В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 21.02.86.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 1/4.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 6,25 бум. л.

Усл.-печ. л. 12,50.

Уч.-изд. л. 15,90.

Усл. кр.-отт. 52,36.

Изд. № 25/4846. Заказ 131.

Тираж 20000 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в редакции по подготовке оригинал-макетов издательства «Мир» на фотонаборном комплексе «Компьюграфик»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7



Издательство МИР предлагает:

В. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.

ВЗРЫВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ОЦЕНКА И ПОСЛЕДСТВИЯ

В 2-х книгах

Перевод с английского



В книге обобщен опыт исследований проблемы опасности взрывов в промышленности при использовании различных взрывчатых материалов — конденсированных взрывчатых веществ, объемов горючих газовых и двухфазных смесей. Здесь же рассматриваются различные аспекты действия взрывных волн, возникающих при разрывах сосудов высокого давления. Способы оценки параметров ударных волн от различных взрывных источников и методы оценки воздействия взрывных нагрузок на объекты, здания, конструкционные элементы описаны с использованием наглядных примеров. Вопросы конструирования хранилищ взрывоопасных материалов, определения безопасных расстояний расположения технологического оборудования или сооружений на взрывоопасном производстве, вопросы сни-

жения уязвимости обслуживающего персонала и — в качестве ответов — целенаправленный поиск путей расчета прочности различных конструкций, как и путей подавления взрывных волн поставлены в зависимости от конкретных инженерных решений.

Книга подготовлена широко известными американскими специалистами по физике взрыва и по проблеме оценки поражающих факторов, сопровождающих фугасное осколочное и тепловое действие идеальных и неидеальных взрывных источников.

Книга адресована широкому кругу специалистов, а также рекомендована в качестве учебного пособия студентам старших курсов институтов и университетов по соответствующим специальностям.

1986, 46 л. Цена 7 р. 60 к. за комплект



В следующем номере:



СРЕДНЕВЕКОВАЯ АСТРОНОМИЯ В СТРАНАХ ИСЛАМА

Т-КЛЕТКА И ЕЕ РЕЦЕПТОР

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ

СЕРДЦЕ КАК ЭНДОКРИННАЯ ЖЕЛЕЗА

**ВОССОЗДАНИЕ ФИЛОГЕНЕЗА ПТИЦ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОПОСТАВЛЕНИЯ ИХ ДНК**

ИСКУССТВО КАМЕННОЙ КЛАДКИ У ИНКОВ

ВИЛЬЯМ ГЕРШЕЛЬ

И СТАНОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИИ

**РАССЕЯНИЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ;
ОПЫТЫ В НЕВЕСОМОСТИ**

**КОМПЬЮТЕР ПРОТИВ КОМПЬЮТЕРА
ЗА ШАХМАТНОЙ ДОСКОЙ**