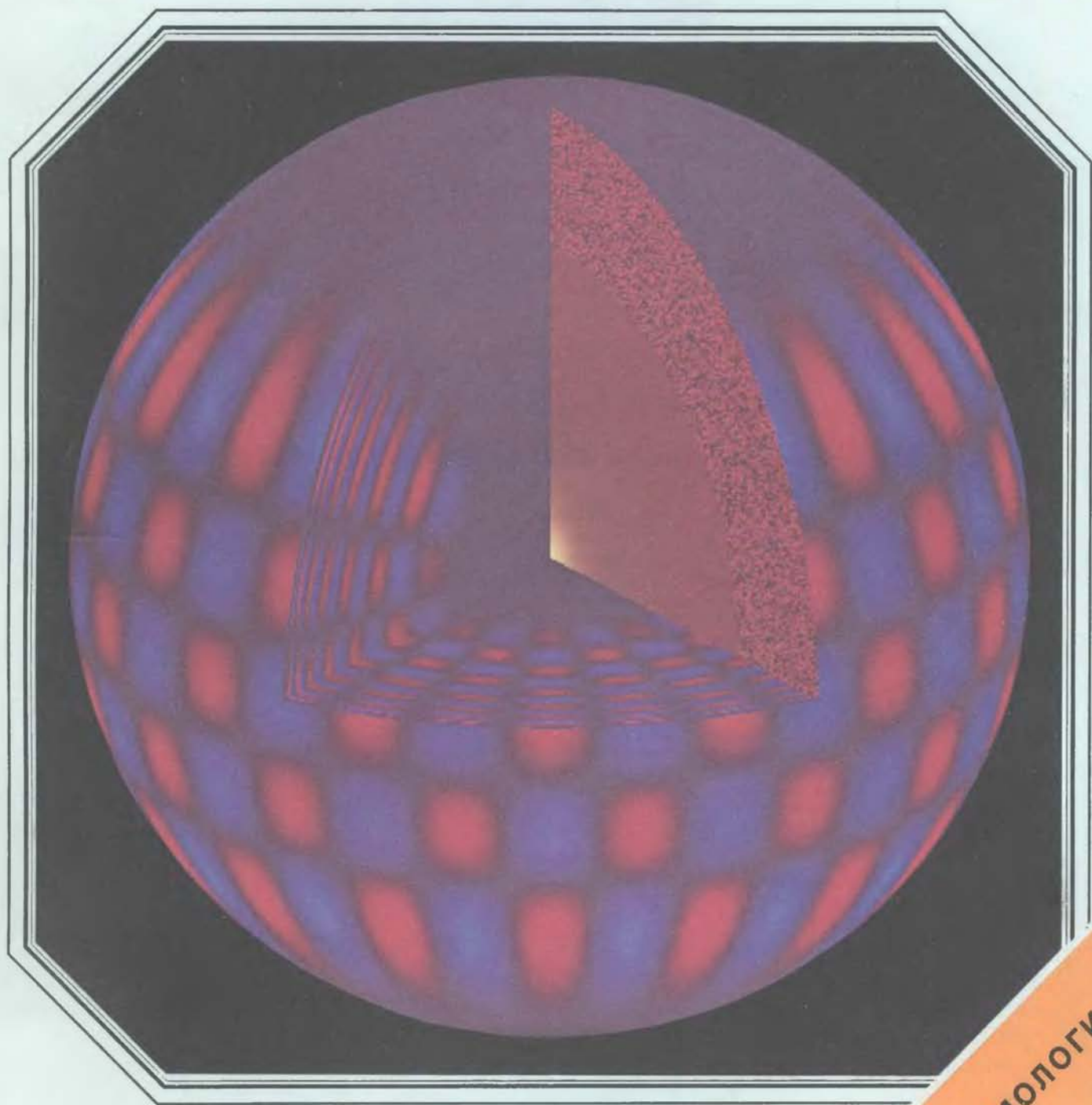


В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Ноябрь **11** 1985

ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ

Издательство **МИР** предлагает:

Б. Бухбергер, Д. Коллинз, Р. Лус

**КОМПЬЮТЕРНАЯ АЛГЕБРА.
СИМВОЛЬНЫЕ И АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ**

Перевод с английского



Коллективная монография известных зарубежных ученых (Австрия, США), дающая систематическое изложение алгоритмических аспектов и математических методов новой области исследований — аналитических вычислений на ЭВМ. Отражены полученные результаты исследований и наиболее важные нерешенные проблемы. Прослеживается четкая связь методов современной алгебры с вопросами их реализации на ЭВМ.

Краткое содержание: Алгебраическое упрощение. Вычисления, связанные с группами и их таблицами характеров. Интегрирование в замкнутом виде. Сум-

мирование в замкнутом виде. Исключение квантора в случае замкнутых полей: путеводитель по литературе. Вещественные нули многочленов. Факторизация многочленов. Обобщенные последовательности остатков. Вычисления в трансцендентных расширениях. Арифметика в алгебраических областях. Системы машинной алгебры. Приложения машинной алгебры. Некоторые полезные оценки.

Для математиков — специалистов по современной алгебре и вычислительной математике, для разработчиков алгоритмов и пользователей программных средств ЭВМ.

«Мир», 1986, 22 л. Цена 2 р. 50 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

№ 11 · НОЯБРЬ 1985

В номере:

- СТАТЬИ**
- 4 Гелиосейсмология** · Джон У. Лейбахер, Роберт У. Нойс, Юрий Тумре, Роджер К. Ульрих
Акустические волны в недрах Солнца проявляются в виде колебаний на его поверхности. Форма и период этих колебаний дают ключ к пониманию структуры, состава и динамики солнечных недр (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)
- 16 Олигосахарины** · Питер Элберсгейм, Алан Г. Дарвилл
Обнаружено, что фрагменты стенки растительной клетки участвуют в регуляции роста, развития, размножения растения, в защите его от болезней (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)
- 24 Как устроен аппарат Гольджи** · Джеймс Э. Ротман
Эта клеточная органелла модифицирует белки, сортирует их и упаковывает для отправки по нужному адресу. Как показали исследования, аппарат Гольджи состоит из трех отделов, или компартментов, каждый из которых специализирован для определенного типа модификации белков (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)
- 38 Биметаллические катализаторы** · Джон Г. Зинфельт
Скорости многих химических реакций удается регулировать, изменяя состав мельчайших скопленных (кластеров) из атомов металлов, используемых в качестве катализаторов. Такие кластеры уже применяют при переработке нефти (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)
- 48 Паук-скакун, который плетет ловчие сети** · Роберт Р. Джексон
В отличие от других пауков-скакунов австралийский паук *Portia fimbriata* плетет ловчие сети. Обладая острым зрением, этот хитрый хищник ловит других пауков и в сети, и просто на земле или растительности (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)
- 58 Оговорки** · Майкл Т. Мотли
Оговорки позволяют судить о психических процессах, лежащих в основе одного из сложнейших видов человеческого поведения — речи. С помощью определенных методик речевые ошибки можно изучать в условиях лабораторного эксперимента (Scientific American, September 1985, Vol. 253, No. 3)

- РУБРИКИ**
- 3** Об авторах
- 15** 50 и 100 лет назад
- 36, 46, 56, 64** Наука и общество
- 67** Наука вокруг нас
- 73** Занимательный компьютер
- 79** Книжки
- 83** 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
Robert Kunzig
James T. Rogers
Joseph Wisnovsky

Samuel L. Howard
ART DIRECTOR
Richard Sasso
PRODUCTION MANAGER
George S. Conn
GENERAL MANAGER

Gerard Piel
CHAIRMAN

© 1985 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

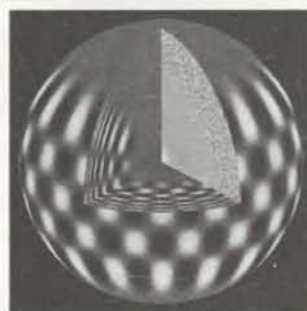
ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ,
ТИПОГРАФИКА РУССКОГО ИЗДАНИЯ,
МАКЕТ СМЕННЫХ ПОЛОС
М. Г. Жуков

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», 1985.

На обложке



ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ

На обложке изображена смоделированная на компьютере трехмерная акустическая волна, распространяющаяся в недрах Солнца. Подобно звуковым волнам в воздухе, солнечные акустические волны распространяются в газообразной среде Солнца в виде чередующихся зон уплотнения и разрежения. Одновременно они приводят в движение солнечный газ: области, показанные красным цветом, в данный момент удаляются от наблюдателя, а области, показанные синим цветом, приближаются. Хотя такие волны возбуждаются глубоко в недрах Солнца, они генерируют на поверхности колебания, которые могут быть зарегистрированы с Земли (см. статью Дж. Лейбахера, Р. Нойса, Ю. Тумре и Р. Ульриха «Гелиосейсмология» на с. 4). Температура, состав и движение вещества внутренних областей Солнца оказывают влияние на частоту колебаний. Таким образом, изучение этих колебаний позволяет «заглянуть» в глубь солнечных недр. На одной стороне разреза показана структура внутренних областей Солнца.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: John W. Leibacher, John Harvey,
National Solar Observatory

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
5	James Kilkelly	26—29	Patricia J. Wynne	54, 55	Robert R. Jackson, University of Canterbury
6, 7	Ian Worpole	30	William G. Dunphy and James E. Rothman, Stanford University	59—62	Jerome Kuhl
8	W. C. Livingston, National Solar Observatory (вверху); James Kilkelly (внизу)	32—34	Patricia J. Wynne	67	Quesada/Burke
9	Ian Worpole	35	James E. Rothman	68	Quesada/Burke (вверху), Michael Goodman (внизу)
10	James Kilkelly	39	E. B. Prestridge, Exxon Research and Engineering Company	69—72	Michael Goodman
11, 12	Ian Worpole	40—44	Andrew Christie	73, 74	Ilil Arbel
17	Kiem Tran Thanh Van, Laboratoire du Phytotron, Gif-sur-Yvette, France	45	L. Lampert, Imperial Oil, Ltd.	76, 77	AT&T Bell Laboratories
18—21	Ilil Arbel	49	Mantis Wildlife Films, Animals, Animals		
22	Kiem Tran Thanh Van	50	Tom Prentiss		
25	© Don Fawcett and Daniel S. Friend, Science Source/Photo Researchers, Inc.	51	Rainer Foelix (вверху), Tom Prentiss (внизу)		
		52, 53	Tom Prentiss		

Об авторах

John W. Leibacher, Robert W. Noyes, Juri Toomre, Roger K. Ulrich (ДЖОН У. ЛЕЙБАХЕР, РОБЕРТ У. НОЙС, ЮРИ ТУМРЕ, РОДЖЕР К. УЛЬРИХ «Гелиосейсмология»). Научные интересы этих исследователей пересекаются в области изучения строения Солнца. Лейбахер — астроном в Национальной солнечной обсерватории. Степень доктора философии в области астрономии получил в Гарвардском университете. До того как в 1983 г. занял свою нынешнюю должность, работал в различных астрофизических лабораториях, включая Лабораторию физики звезд и планет во Франции. Нойс — профессор астрономии в Гарварде и астрофизик в Смитсоновской астрофизической обсерватории, где с 1973 по 1980 г. был заместителем директора Астрофизического центра. Степень бакалавра получил в 1957 г. в Хаверфордском колледже, докторскую степень — в 1963 г. в Калифорнийском технологическом институте. Один из тех, кто открыл «пятиминутные» колебания на Солнце. Тумре — профессор на кафедре астрофизики, планетарных и атмосферных наук Колорадского университета в Боулдере, ведет также работу в Объединенном институте лабораторной астрофизики этого же университета. Дипломную работу выполнял в Массачусетском технологическом институте; докторскую степень получил в 1967 г. в Кембриджском университете. До того как в 1971 г. получил должность в Колорадском университете, некоторое время работал в Институте по изучению космического пространства НАСА и на кафедре математики в Нью-Йоркском университете. Ульрих — профессор астрономии в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе. Ученые степени получил в Калифорнийском университете в Беркли: степень бакалавра в области химии в 1963 г., докторскую степень в области астрономии в 1968 г. До того как в 1970 г. переехал в Лос-Анджелес, работал над проблемой солнечных нейтрино в Калифорнийском технологическом институте.

Peter Albersheim, Alan G. Darvill (ПИТЕР ЭЛБЕРСГЕЙМ, АЛАН Г. ДАРВИЛЛ «Олигосахарины»). Элберсгейм окончил в 1956 г. Корнелльский университет со степенью бакалавра по фитопатологии. В 1959 г. в Калифорнийском технологическом институте он получил степень доктора фи-

лософии в области биохимии. Работал в различных научных учреждениях, в том числе преподавал пять лет в Гарвардском университете. В 1964 г. перешел в Колорадский университет в Боулдере, где в 1970 г. стал профессором молекулярной и клеточной биологии и биологии развития. Дарвилл получил степень бакалавра по биологии растений в 1973 г. в Вулвергемптонском политехническом институте (Великобритания) и степень доктора философии в области физиологии растений — в Уэльском университетском колледже в 1976 г. Затем стал сотрудником Колорадского университета, где в настоящее время он доцент кафедры молекулярной и клеточной биологии и биологии развития. В Университете Джорджии организуется Центр по изучению сложных углеводов, в котором Элберсгейм будет директором, а Дарвилл — его помощником.

James E. Rothman (ДЖЕЙМС Э. РОТМАН «Как устроен аппарат Гольджи») — профессор биохимии Медицинской школы Станфордского университета. Изучал физику в Йельском колледже, а на старших курсах заинтересовался биохимией клетки. В 1976 г. получил степень доктора философии в Медицинской школе Гарвардского университета. Два года вел научную работу в Массачусетском технологическом институте, после чего перешел в Станфордский университет. Ротман — член редколлегии ряда научных журналов, в том числе «Science» и «Cell».

John H. Sinfelt (ДЖОН Г. ЗИНФЕЛЬТ «Биметаллические катализаторы») — старший научный консультант в Объединенной научно-исследовательской лаборатории корпорации Еххон. В 1951 г. получил степень бакалавра в Университете шт. Пенсильвания, после чего продолжил работу в области инженерных проблем химического производства в качестве аспиранта в Иллинойском университете в Эрбана-Шампейн. Сразу после получения в 1954 г. докторской степени начал работать в корпорации Еххон. Зинфельт активно участвует в фундаментальных исследованиях, проводимых в университете.

Robert R. Jackson (РОБЕРТ Р. ДЖЕКсон «Паук-скаун, который плетет ловчие сети») — старший лектор кафедры зоологии Кентербе-

рийского университета в Новой Зеландии. Родился и учился в США: в Университете шт. Северная Каролина делал дипломную работу, в Калифорнийском университете в Беркли получил в 1976 г. докторскую степень в области зоологии. В течение года вел научную работу в департаменте психического здоровья шт. Северная Каролина, затем уехал в Новую Зеландию. В Кентерберийском университете он преподает этологию и эволюционную биологию. Исследования, описанные в публикуемой статье, Джексон начал, когда работал по приглашению в отделе нейробиологии Школы биологических наук Австралийского национального университета.

Michael T. Motley (МАЙКЛ Т. МОТЛИ «Оговорки») — профессор коммуникологии на факультете риторики Калифорнийского университета в Дейвисе. Степени бакалавра и магистра искусств получил в Техасском университете в 1965 и 1967 гг. соответственно. Психолингвистикой увлекался, будучи еще студентом-старшекурсником. Речевые ошибки начал исследовать во время работы над докторской диссертацией по проблемам коммуникации в Университете шт. Пенсильвания, где в 1970 г. получил степень доктора философии.

Издательство
МИР
предлагает:

Хенри Д.
**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
ТЕОРИЯ ПОЛУЛИНЕЙНЫХ
ПАРАБОЛИЧЕСКИХ
УРАВНЕНИЙ**

Перевод с английского

Книга известного американского математика, посвященная качественной (геометрической) теории нелинейных параболических уравнений. В ней изучается поведение решений в окрестности точек различного типа; приведены конкретные примеры из разных областей.

Для специалистов по распределенным системам.

1985, 18 л., цена 2 р. 60 к.



Гелиосейсмология

Акустические волны в недрах Солнца

проявляются в виде колебаний на его поверхности.

Форма и период этих колебаний дают ключ к пониманию структуры, состава и динамики солнечных недр

ДЖОН У. ЛЕЙБАХЕР, РОБЕРТ У. НОЙС,

ЮРИ ТУМРЕ, РОДЖЕР К. УЛЬРИХ

ИЗУЧЕНИЕ ближайшей к нам звезды — Солнца — играет важную роль в развитии представлений о строении звездных недр. Однако видимая поверхность, фотосфера, представляет собой слой толщиной лишь несколько сотен километров (менее одной тысячной солнечного радиуса), поэтому исследование фотосферы позволяет получить лишь косвенные данные о структуре и динамике Солнца. Движение солнечных пятен показывает, что Солнце вращается с периодом около одного месяца, причем на экваторе вращение более быстрое, чем у полюсов. Зернистая структура поверхности, называемая грануляцией, постоянно изменяется, указывая на сильное турбулентное движение газа вблизи поверхности; едва различимая крупномасштабная структура, известная как супергрануляция, свидетельствует о циркуляции газа, охватывающей, как полагают, область глубиной десятки тысяч километров. Магнитные поля, меняющиеся сложным образом в соответствии с 11-летним циклом солнечной активности, также проявляют себя на поверхности Солнца.

Явления, наблюдаемые на поверхности, отражают процессы, происходящие во внутренних областях Солнца: в ядре, где за счет термоядерного синтеза генерируется энергия; в зоне чистого равновесия, где энергия медленно диффундирует к внешним слоям благодаря атомному поглощению и излучению; во внешней конвективной зоне (ее толщина, как полагают, составляет 30% радиуса Солнца, а масса — около 1% его массы), где опускающиеся и поднимающиеся вихри газа переносят энергию к фотосфере. Но, так как эти области нельзя наблюдать непосредственно, большинство наших представлений о внутренней структуре Солнца, впрочем, как и звезд, носят гипотетический характер.

Новый путь к исследованию внутренних областей Солнца открыла гелиосейсмология. Постоянные волно-

вые движения, подобные сейсмическим волнам на Земле, сотрясают недра Солнца. Как геофизики изучают сейсмические волны, чтобы понять условия внутри Земли, так и специалисты по физике Солнца используют колебания, наблюдаемые на Солнце, для получения информации о его внутренней структуре.

При землетрясении внутри Земли распространяются сейсмические волны двух типов: волны сдвига и волны сжатия. В волнах сдвига вещество смещается перпендикулярно направлению распространения. Эти волны могут существовать только в твердых телах и, следовательно, не возникают в газообразной среде Солнца. В акустических волнах, или волнах сжатия, среда сжимается и расширяется вдоль направления распространения; такие волны могут проходить через внутренние области Солнца. Наконец, в газообразной среде, такой, как Солнце или атмосфера Земли, могут распространяться волны третьего типа — внутренние гравитационные. До последнего времени основное внимание уделялось акустическим волнам на Солнце. Скорость и направление их распространения зависят от температуры, состава и движения вещества внутри Солнца. Следовательно, акустические волны служат чувствительным индикатором внутренней структуры Солнца.

Распространение акустических волн внутри Солнца нельзя наблюдать непосредственно. Однако их влияние

на солнечную поверхность обнаруживается на спектрограммах солнечного диска, а также при измерениях поверхностной яркости. Под воздействием волн, достигающих поверхности Солнца, наружный слой газа начинает подниматься и опускаться. Это приводит к изменению частот спектральных линий в излучаемом Солнцем свете. Волны вызывают также сжатие и разрежение газа на поверхности, в результате чего меняются его температура и яркость. Сейсмическая активность Солнца крайне слаба, поэтому связанные с ней флуктуации частоты и яркости излучаемого света малы. Тем не менее уже удалось зарегистрировать широкий спектр волн. Анализ этого спектра позволяет изучать внутреннюю структуру и динамику Солнца по непосредственным наблюдениям.

ДО ВОЗНИКНОВЕНИЯ гелиосейсмологии теория строения звезд была основным инструментом в изучении внутренней структуры звезд. Эта теория способствовала появлению численных моделей, базирующихся на уравнениях, которые описывают физические процессы внутри звезды. В таких моделях состояние Солнца в данный момент времени определяется его состоянием в некий нулевой момент, в который предполагается известным его химический состав. Модель описывает эволюцию Солнца вплоть до нынешнего возраста (4,8 млрд. лет), при этом рассчиты-

КОЛЕБАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА возникают под влиянием акустических волн, резонирующих в его внутренних областях. На рисунке представлены 4 из 10 млн. солнечных резонансных мод, рассчитанные с помощью ЭВМ. Области, движущиеся к наблюдателю, показаны синим цветом, удаляющиеся — красным. Такие движения участков поверхности можно наблюдать благодаря доплеровскому смещению частоты света, поглощаемого движущимся газом, и благодаря вариациям яркости. Зная период и общую картину поверхностных колебаний, можно восстановить пространственную структуру резонанса и определить условия в недрах Солнца. Каждая мода колебаний характеризуется степенью (l) и азимутальным порядком (m). Степень равна полному числу узлов — окружностей, вдоль которых газ на поверхности сферы неподвижен (на рисунке показаны серыми полосками между цветными зонами). Азимутальное число равно числу узлов, пересекающих солнечный экватор.

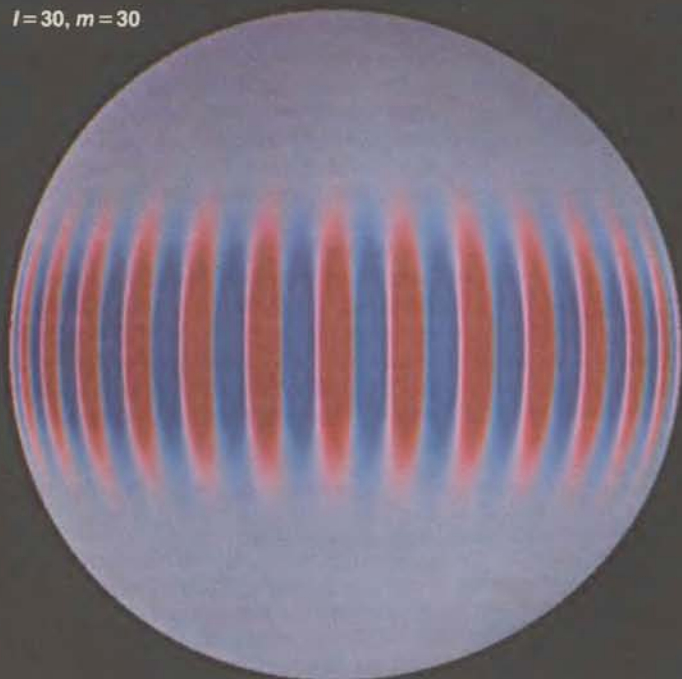
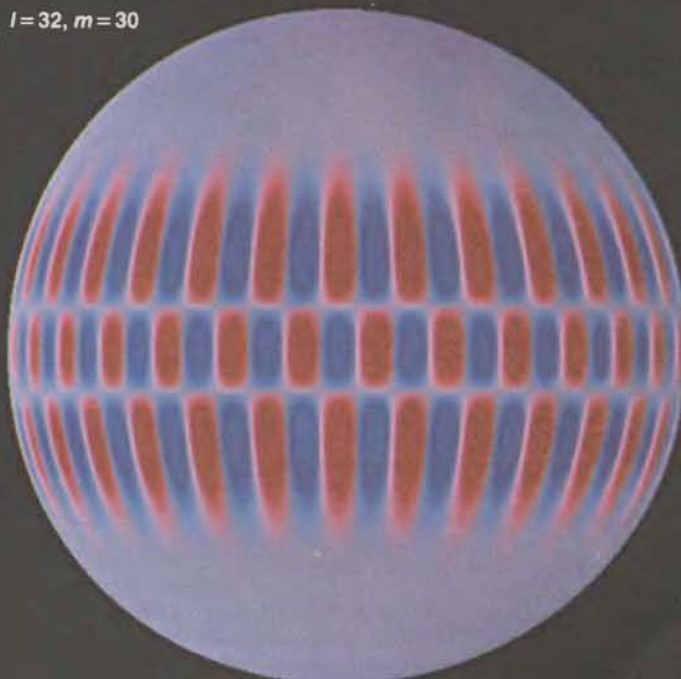
ваются изменения радиуса и светимости, происходящие по мере того, как в результате термоядерных реакций в ядре Солнца водород превращается в гелий.

Нам точно не известны ни содержание гелия в только что образовавшемся Солнце, ни эффективность конвективного переноса энергии в его внешних слоях. Обе эти величины можно подобрать таким образом, чтобы получить модель, которая согласуется со светимостью, массой, радиусом и возрастом современного Солнца. Такая модель, часто называемая стан-

дартной солнечной моделью, предполагает, что Солнце первоначально состояло на 73% из водорода и на 25% из гелия (по массе). Эти цифры согласуются с предположениями о количестве гелия, которое, как полагают, образовалось при Большом взрыве. Стандартная модель предсказывает распределение давления, температуры, плотности и химического состава по глубине внутри Солнца. С помощью гелиосейсмологии эти предсказания можно проверить. Для этого нужно сравнить измеренные харак-

теристики солнечных акустических волн с характеристиками, рассчитанными в рамках солнечной модели.

Обращаясь к необходимости пересмотра стандартной солнечной модели, следует отметить, что гелиосейсмология может позволить физикам преодолеть основную трудность теории: проблему солнечных нейтрино. Когда-то считалось, что проблема моделирования звезд главной последовательности, таких, как Солнце, уже решена, за исключением, быть может, некоторых деталей. Однако в

 $l = 2, m = 0$  $l = 10, m = 0$  $l = 30, m = 30$  $l = 32, m = 30$ 

последние 15 лет правильность теории была поставлена под вопрос. Сомнения зародились в результате исследований Р. Дэвиса и его коллег из Брукхейвенской национальной лаборатории, измеривших поток солнечных нейтрино — субатомных, трудно регистрируемых частиц, имеющих, по-видимому, нулевую массу покоя, которые рождаются при термоядерных реакциях в солнечном ядре. Дэвис и его коллеги обнаружили, что в действительности поток нейтрино примерно в три раза меньше, чем предсказывает стандартная солнечная модель.

Для объяснения этого расхождения были предложены различные модификации стандартной модели, но ни

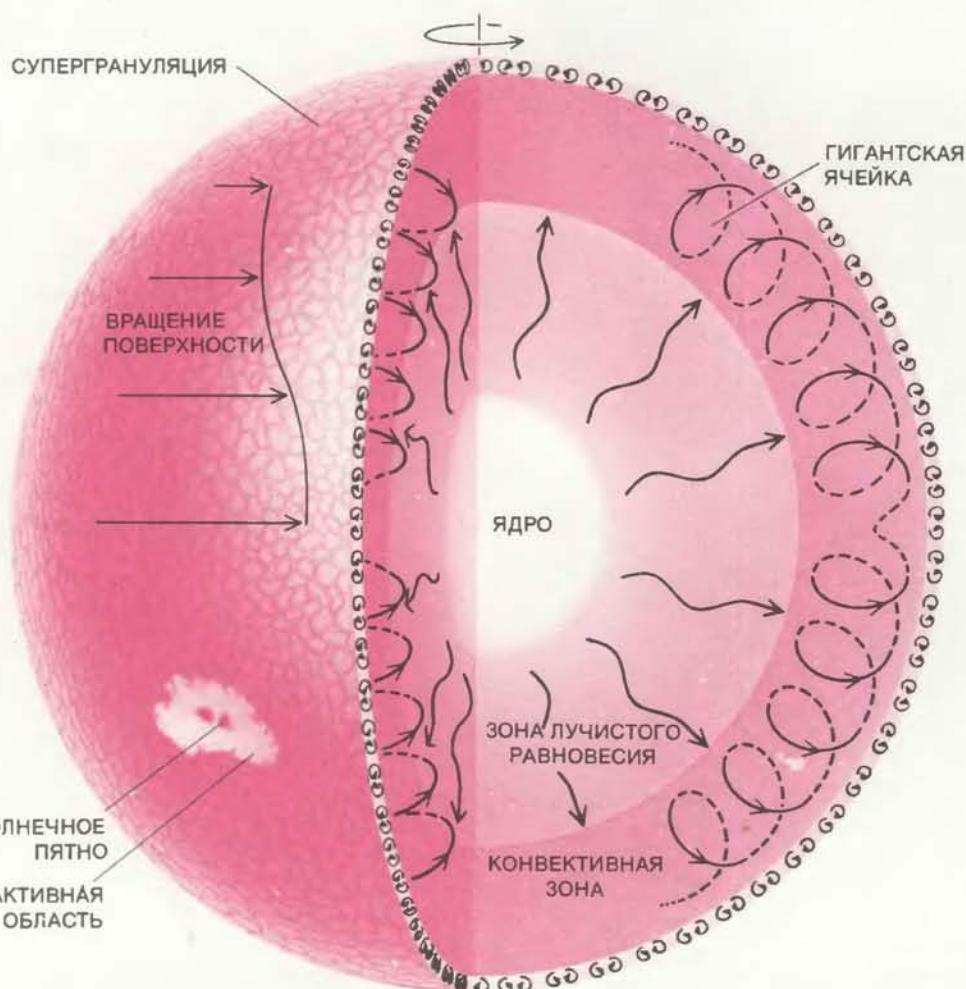
одна из них не решила проблемы. Известно, что генерация нейтрино резко сокращается с уменьшением температуры. Исходя из этого, некоторые специалисты предложили модели, в которых температура солнечного ядра была несколько меньше, но полная скорость энерговыделения Солнца и его радиус остались прежними. Если, например, ядро Солнца содержит больше водорода и меньше гелия, то и при более низкой температуре внутреннее давление способно поддерживать наблюдаемый радиус Солнца. Одни теоретики допускают, что в момент образования Солнца гелия было меньше, чем предполагалось ранее. Другие полагают, что благодаря перемешиванию «свежий» водород по-

падает в ядро Солнца из окружающих областей, «разбавляя» гелий, образовавшийся в результате ядерных реакций.

Другой путь решения проблемы предполагает, что вместо высокой температуры основную роль в поддержании требуемого радиуса Солнца может играть центробежная сила или магнитное давление. Для этого требуется высокая скорость вращения внутренних слоев Солнца или наличие очень сильных магнитных полей. Согласно еще одному предположению, проблема связана не с теорией строения Солнца как таковой, а с физикой элементарных частиц. Если (в противоречии с существующим сейчас мнением) нейтрино имеют массу*, то солнечные нейтрино того типа, который регистрируется в нейтринных экспериментах, могут спонтанно переходить в любой из двух других типов перед тем, как попасть на Землю. Если масса нейтрино достаточно велика, то энергия нейтрино у поверхности Земли будет распределяться равномерно между тремя типами этих частиц и излученные Солнцем нейтрино будут детектироваться только в одном случае из трех. Такое решение ловко устраняет противоречие между теорией и экспериментом. Гелиосейсмология, рисуя картину строения внутренних областей Солнца, которая не зависит от теоретических моделей, поможет определить, какое из предложенных решений является правильным.

ИЗУЧЕНИЕ колебаний Солнца началось в 1960 г. в Калифорнийском технологическом институте, когда Р. Лейтон, Р. Нойс и Дж. Саймон начали анализировать распределение скоростей газа на поверхности Солнца. Метод основывался на измерении доплеровского смещения (изменения частоты излучения при движении источника относительно наблюдателя) линий поглощения — темных линий в солнечном спектре. Линии поглощения соответствуют тем длинам волн, на которых вещество наружных слоев Солнца поглощает излучение от более горячих внутренних слоев. Уменьшение, или голубое смещение, длины волны линий поглощения от отдельной области Солнца означает, что эта область движется по направлению к наблюдателю; увеличение,

* Эксперименты, свидетельствующие в пользу наличия у нейтрино массы, состоявшейся около 1/10 000 массы электрона, проведены в последние годы в СССР группой сотрудников Института теоретической и экспериментальной физики АН СССР под руководством В. А. Любимова. — *Прим. ред.*



О СТРУКТУРЕ ВНУТРЕННИХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА можно строить лишь предположения. Энергия генерируется благодаря реакциям термоядерного синтеза в ядре и диффундирует к поверхности через зону лучистого равновесия за счет атомного поглощения и излучения. В конвективной зоне основным механизмом переноса энергии служит циркуляция вещества: горячий газ поднимается к поверхности, более холодный опускается вниз. Конвекция проявляется на поверхности в виде мелкомасштабной грануляции (на рисунке не показана) и супергрануляции, имеющей форму ячеек размером около 30 тыс. км. Ниже ячеек супергрануляции в глубокой конвективной зоне, вероятно, располагаются очень большие конвективные образования, так называемые гигантские ячейки. Взаимодействие конвекции и вращения Солнца приводит к тому, что скорость вращения меняется с широтой (*прямые стрелки*) и с глубиной. Взаимодействие дифференциального вращения с движениями проводящего газа генерирует магнитное поле, которое проявляется в виде солнечных пятен и активных областей. Гелиосейсмология должна помочь уточнить строение солнечных недр.

или красное смещение, означает, что область удаляется от наблюдателя.

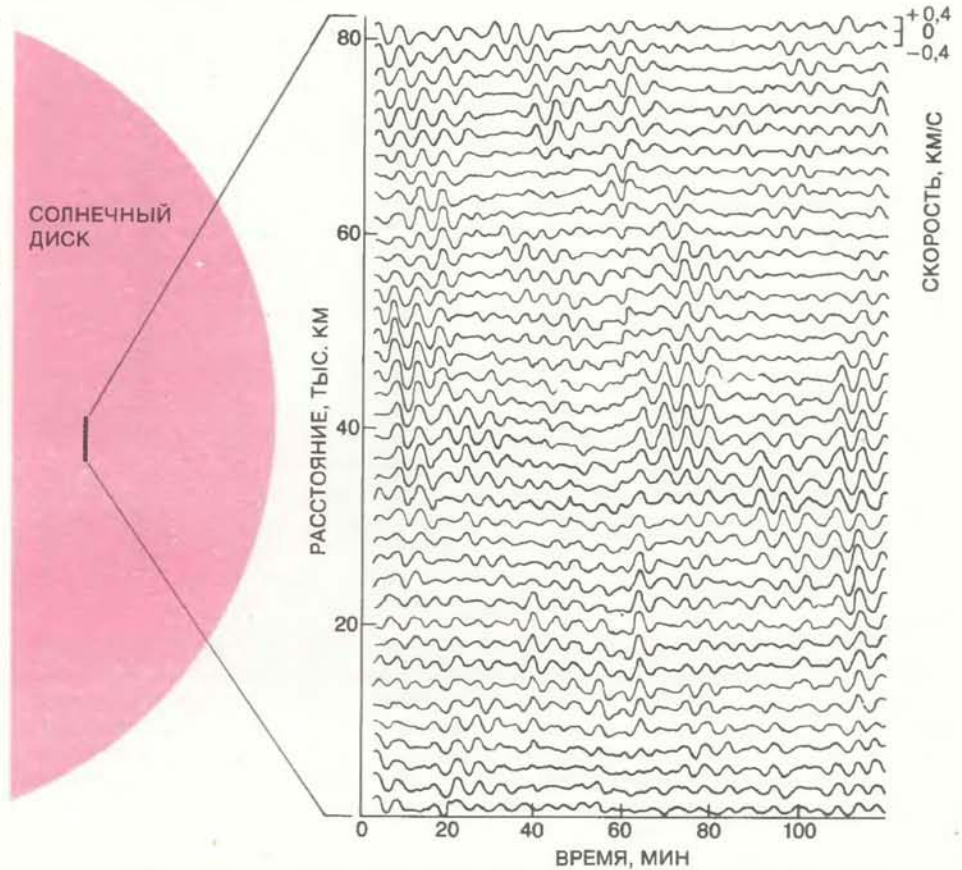
Исследователи полагали, что распределение скоростей газа, полученное из доплеровских смещений, будет хаотическим в соответствии с хаотическим изменением яркости солнечной грануляции. К своему удивлению, они обнаружили, что скорости газа в атмосфере Солнца испытывают колебания: на данном участке газ поднимается и опускается с периодом около пяти минут. Такие колебания не длились непрерывно: они представляли собой волновой пакет длительностью около получаса.

Вначале была выдвинута гипотеза, что наличие волновых пакетов отражает кратковременную реакцию солнечной атмосферы на случайные возмущения конвективной зоны. В 1970 г. было предложено более правдоподобное объяснение пятиминутных колебаний. Р. Ульрих и независимо от него Дж. Лейбахер и Р. Стейн (который сейчас работает в Университете шт. Мичиган), воспользовавшись теоретическими моделями Солнца, показали, что внутренние области Солнца могут служить акустическим резонатором. Они предположили, что звуковые волны генерируются и удерживаются в недрах Солнца.

Известные акустические резонаторы, такие, как органная труба или литавра, представляют собой замкнутые объемы, в которых акустические волны удерживаются за счет многократного отражения от стенок. Во внутренних областях Солнца, где ограничивающие поверхности отсутствуют, отражение и преломление акустических волн может происходить за счет градиентов плотности и температуры.

Верхняя граница отражения в солнечном акустическом резонаторе лежит как раз под видимой поверхностью Солнца, где плотность резко падает с увеличением расстояния от центра. Звуковая волна, отраженная от этой верхней границы, распространяется вниз и достигает нижней границы, которая обусловлена повышением температуры. Градиент температуры приводит к увеличению скорости звука с глубиной. Следовательно, более глубокая часть волнового фронта, наклонно распространяющегося в глубь Солнца, стремится догнать ту часть фронта, которая находится ближе к поверхности. Фронт волны постепенно изгибается, пока волна не поворачивает обратно к поверхности Солнца. Захваченные волны, таким образом, распространяются вдоль дугообразных траекторий под поверхностью Солнца.

Нижняя часть дуг, где волна распространяется горизонтально, прихо-



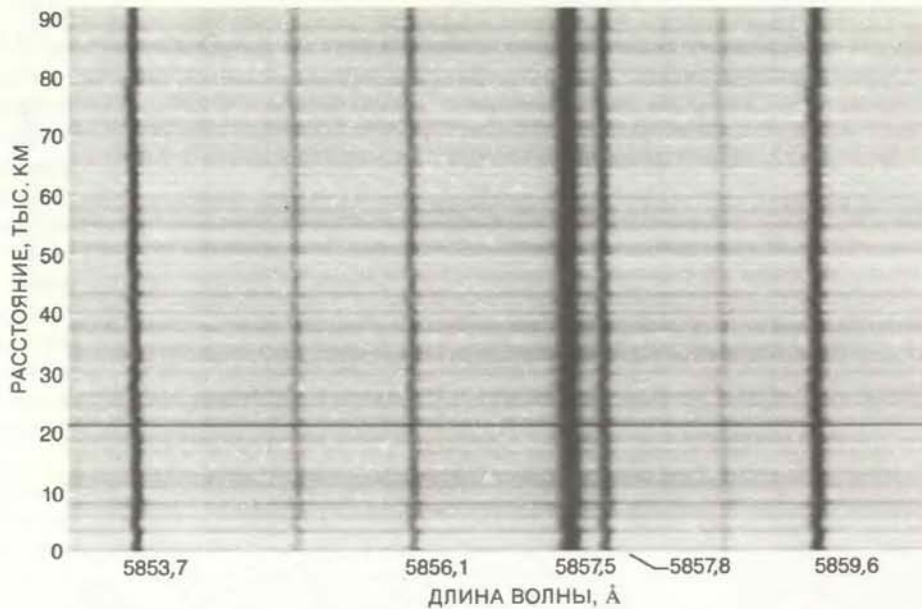
ПЯТИМИНУТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ видны на графиках зависимости радиальной скорости от времени для различных точек солнечной поверхности. В каждой точке газ поднимается и опускается с периодом около 5 мин. Максимальное значение радиальной скорости около 0,4 км/с. Движения газа на поверхности вызваны суперпозицией 10 млн. различных акустических резонансных мод. Моды интерферируют друг с другом, что приводит к усилению и ослаблению движений и создает переменное распределение скоростей по поверхности Солнца. С. Масмен и Д. Раст из Обсерватории Сакраменто-Пик составили карту этих движений, основываясь на доплеровском смещении спектральных линий, измеренном в каждой точке.

дится на нижнюю границу акустического резонатора. В этом месте отношение горизонтальной длины волны (расстояния между двумя последовательными волновыми фронтами, измеренного в горизонтальном направлении) к ее периоду (величине, известной как горизонтальная фазовая скорость волны) равно локальной скорости звука. Таким образом, глубина резонатора различна для волн с разными горизонтальными длинами или периодами. На верхней границе резонатора, у поверхности, волны генерируют колебания, наблюдения которых позволяют определить период и горизонтальную длину волны. Из этих величин можно получить скорость звука в основании резонатора.

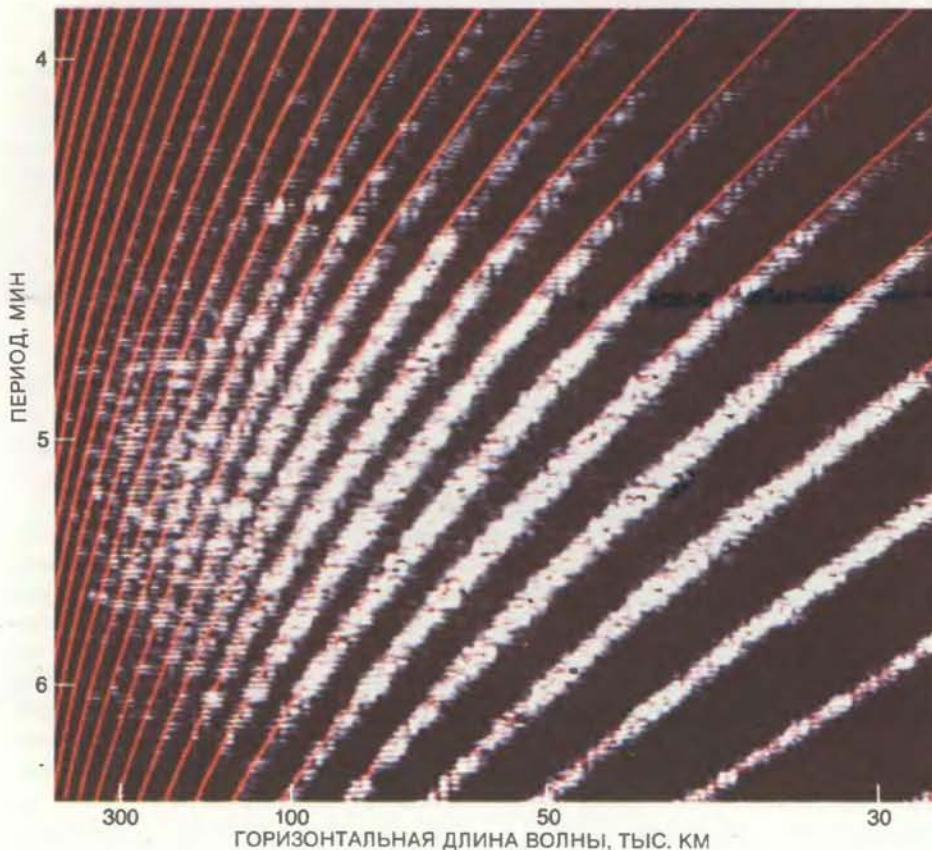
Каким образом в Солнце возбуждаются акустические волны? Возможно, они являются результатом сильных турбулентных движений в конвективной зоне, способных случайным образом возбуждать и гасить колебания. Акустические волны могут также генерироваться потоком лучистой энергии внутри Солнца: попере-

менное сжатие и разрежение газа может приводить к определенной задержке потока в некотором слое с последующим преобразованием избытка тепла в энергию волны.

Анализ свойств акустических резонаторов подтвердил, что пульсации, наблюдаемые на поверхности Солнца, представляют собой акустические волны. В акустическом резонаторе волна с определенным периодом интерферирует со своими отражениями от стенок, в результате чего возникает резонансная стоячая волна. Всякий акустический резонатор имеет основной период резонанса, примерно равный времени, за которое звук проходит от верхней границы отражения до нижней и обратно. В Солнце основной период связан с волной, имеющей определенную горизонтальную длину. Волны с более короткими периодами и такой же горизонтальной длиной (обертон) тоже могут резонировать в недрах Солнца. Однако для них резонатор будет более глубоким, потому что их горизонтальная фазовая скорость больше и, следова-



НА СПЕКТРОГРАММЕ можно увидеть доплеровское смещение спектральных линий газа, находящегося на поверхности Солнца. По оси абсцисс отложена длина волны, по оси ординат — координата области на солнечном диске, которая «просматривается» спектрографом. Темные вертикальные линии, приходящиеся на те длины волн, на которых газ у поверхности поглощает свет, излученный недрами Солнца, состоят из смещенных относительно друг друга отрезков. Смещения вызваны радиальными движениями газа.



СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДАЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ, выполненное с помощью ЭВМ, показало, что наблюдаемые на солнечной поверхности пульсации обусловлены резонансными акустическими волнами в недрах Солнца. Резонировать могут только волны с определенными соотношениями между периодом и горизонтальной длиной. Цветные кривые соответствуют резонансным модам, предсказываемым «стандартной солнечной моделью», в которой предполагается, что в момент образования Солнце содержало 25% гелия. Яркие участки соответствуют модам, выявленным в ходе шестидневных измерений скорости газа на солнечной поверхности, которые были проведены Т. Дьювеллом-младшим и Дж. Гарвеем из Национальной солнечной обсерватории. Согласие между наблюдениями и теорией в целом подтверждает тот факт, что Солнце является акустическим резонатором. В то же время некоторое расхождение говорит о необходимости усовершенствования теоретических моделей.

тельно, больше глубина, на которой фазовая скорость равна локальной скорости звука.

Для резонирования моды необходимо, чтобы на дуге, протянувшейся от поверхности Солнца до нижней границы акустического резонатора и обратно, укладывалось целое число длин волн. При заданной горизонтальной длине волны резонаторы с подходящей для резонанса глубиной будут существовать только для волн с определенными периодами. На двумерной диаграмме энергетического спектра, где амплитуда представлена как функция горизонтальной длины волны и периода, наиболее сильные пульсации Солнца образуют ряд узких полос (в трехмерном изображении «хребтов», или «гребней». — *Ред.*), соответствующих значениям периода и горизонтальной длины волны для резонансных мод. В 1975 г. Ф.-Л. Дойбнер (сейчас он работает в Вюрцбургском университете) произвел первые точные измерения периода и горизонтальной длины волны пятиминутных колебаний. В амплитудном спектре, построенном по его данным, присутствовали узкие гребни большой амплитуды, что подтвердило сделанное ранее предсказание.

ОДНАКО между комбинациями частот и длин волн, измеренными Дойбнером и рассчитанными в рамках стандартной солнечной модели Х. Андо и Ё. Осаки из Токийского университета, обнаруживалось небольшое, но систематическое расхождение. Оно указывало на необходимость изменения некоторых параметров солнечной модели, в первую очередь эффективности конвективных процессов вблизи поверхности Солнца. Более эффективная конвекция приводит к уменьшению градиента температуры и, следовательно, к более медленному возрастанию скорости звука с глубиной. Ожидалось, что с такой поправкой резонансные моды, получающиеся в солнечной модели, будут лучше согласовываться с экспериментальными данными.

Усовершенствованные эксперименты Э. Родеса-младшего, Р. Ульриха и Дж. Саймона по измерению пятиминутных колебаний позволили получить достаточно надежные данные для определения эффективности конвекции и, следовательно, глубины конвективной зоны. Они и независимо от них Д. Гаф из Кембриджского университета сделали вывод о том, что конвективная зона имеет большую глубину, чем было принято считать. Однако Солнце с более глубокой конвективной зоной не могло бы иметь наблюдаемый радиус, если только содержание гелия в его ядре не было выше, чем предполагалось

ранее. В то же время увеличенный нейтринный поток от ядра с высоким содержанием гелия усложнил бы проблему солнечных нейтрино.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ спектр пятиминутных колебаний показывает, что наблюдаемые колебания возникают в результате суперпозиции нескольких миллионов резонансных мод с различными периодами и горизонтальными длинами волн. Моды с самыми большими амплитудами имеют период от 3 до 6 мин, их горизонтальные длины волн составляют от нескольких тысяч километров (размеры отдельных гранул) до 4,5 млн. км (длина окружности Солнца). Отдельные моды имеют амплитуду (выраженную величиной радиальной скорости поверхностных колебаний) 20 см/с и меньше. Однако их случайная суперпозиция создает колебания с большой амплитудой (максимальная скорость составляет 500 м/с). Такие пульсации, впервые наблюдавшиеся в 1960 г., возбуждаются и затухают, когда отдельные волновые моды сближаются и расходятся по фазе.

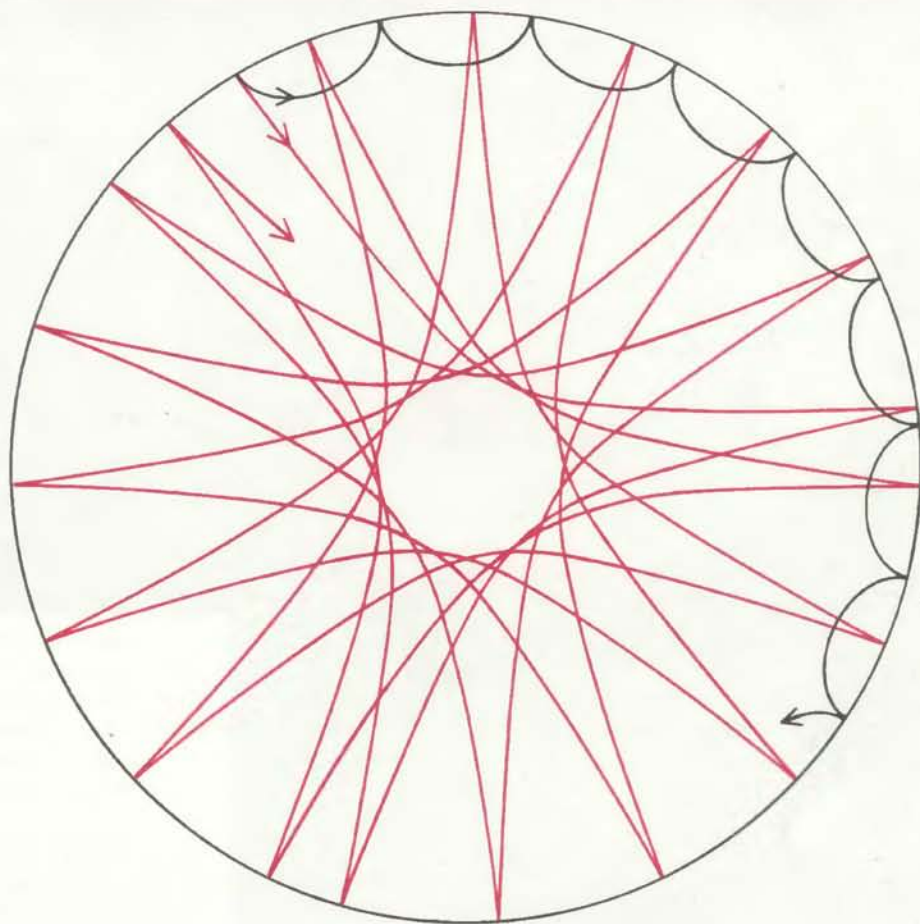
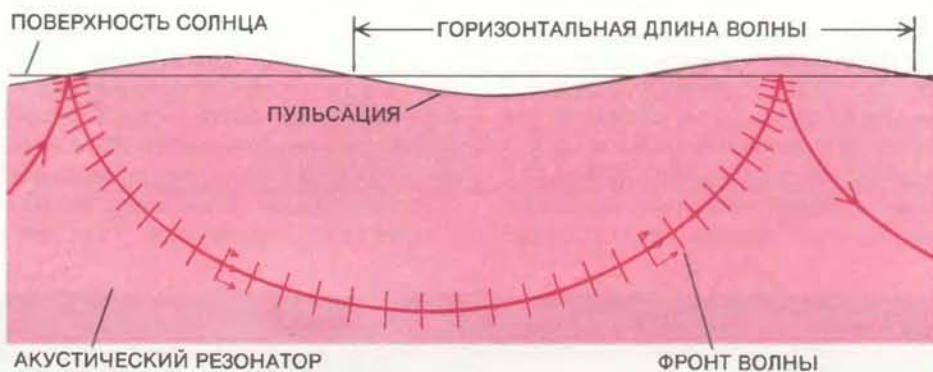
Несмотря на трудности, возникающие при рассмотрении совокупности колебаний, отдельные резонансные моды можно описать достаточно просто. Так как резонаторы расположены внутри сферического Солнца, математическое описание пространственной структуры резонанса должно включать функции, зависящие от широты, долготы и радиуса. Для описания поверхностных конфигураций колебаний используются две величины — степень и азимутальный порядок. Степень моды, обозначаемая l , — это число поверхностных узловых линий, т.е. окружностей на поверхности сферы, где скорость, обусловленная волной, равна нулю. Расстояние между двумя соседними узлами составляет около половины горизонтальной длины волны. Таким образом, волны с малой l имеют большую горизонтальную длину. Азимутальный порядок, обозначаемый m , равен числу узловых линий, пересекающих экватор.

Глубинная структура колебания определяется его радиальным порядком (n), известным также как оберточное число. Он соответствует числу вертикальных длин волн или, иными словами, числу узловых линий вдоль радиуса сферы. Для каждой поверхностной конфигурации с определенными значениями l и m существует набор значений n , представляющих основную резонансную частоту ($n = 1$) и ее обертоны с меньшими периодами. Каждая мода, характеризуемая конкретным набором l , m и n , имеет определенную частоту колебаний.

Так как в Солнце глубина акустического резонатора растет с увеличением горизонтальной длины волны и с уменьшением периода, моды с большим отношением n/l проникают глубоко в недра Солнца. Если l равно нулю, что соответствует резонансной моде, в которой вся сфера расширяется и сжимается как целое, то отношение n/l бесконечно; это значит, что

такая волна сжатия проникает в самый центр Солнца.

МОДЫ очень низкой степени с горизонтальной длиной волны, сравнимой с размерами Солнца, наиболее интересны для изучения, так как их легко можно выделить из сложного спектра, состоящего из возбуждающих поверхность Солнца мод более



ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ волн под поверхностью Солнца приводит к удержанию акустических волн внутри резонатора. Волна, распространяющаяся из недр Солнца, отражается за счет резкого уменьшения плотности у солнечной поверхности (вверху). Отраженная волна, проникая в глубь Солнца, преломляется за счет увеличения скорости звука с глубиной. В результате фронт волны поворачивается и волна начинает двигаться к поверхности. Захваченные таким образом волны интерферируют сами с собой и создают резонансные моды, которые можно обнаружить по колебаниям газа на поверхности. Горизонтальная длина волны и период поверхностных колебаний зависят от периода волны, вызывающей резонанс, и глубины ее проникновения. Глубина проникновения в свою очередь зависит от ориентации волны в момент ее отражения. Как показано на разрезе Солнца (внизу), чем меньше угол между направлением распространения волны и направлением на центр, тем слабее преломляется волна и тем глубже она проникает. Волны, идущие под большими углами, преломляются сильнее и удерживаются в более мелком резонаторе.

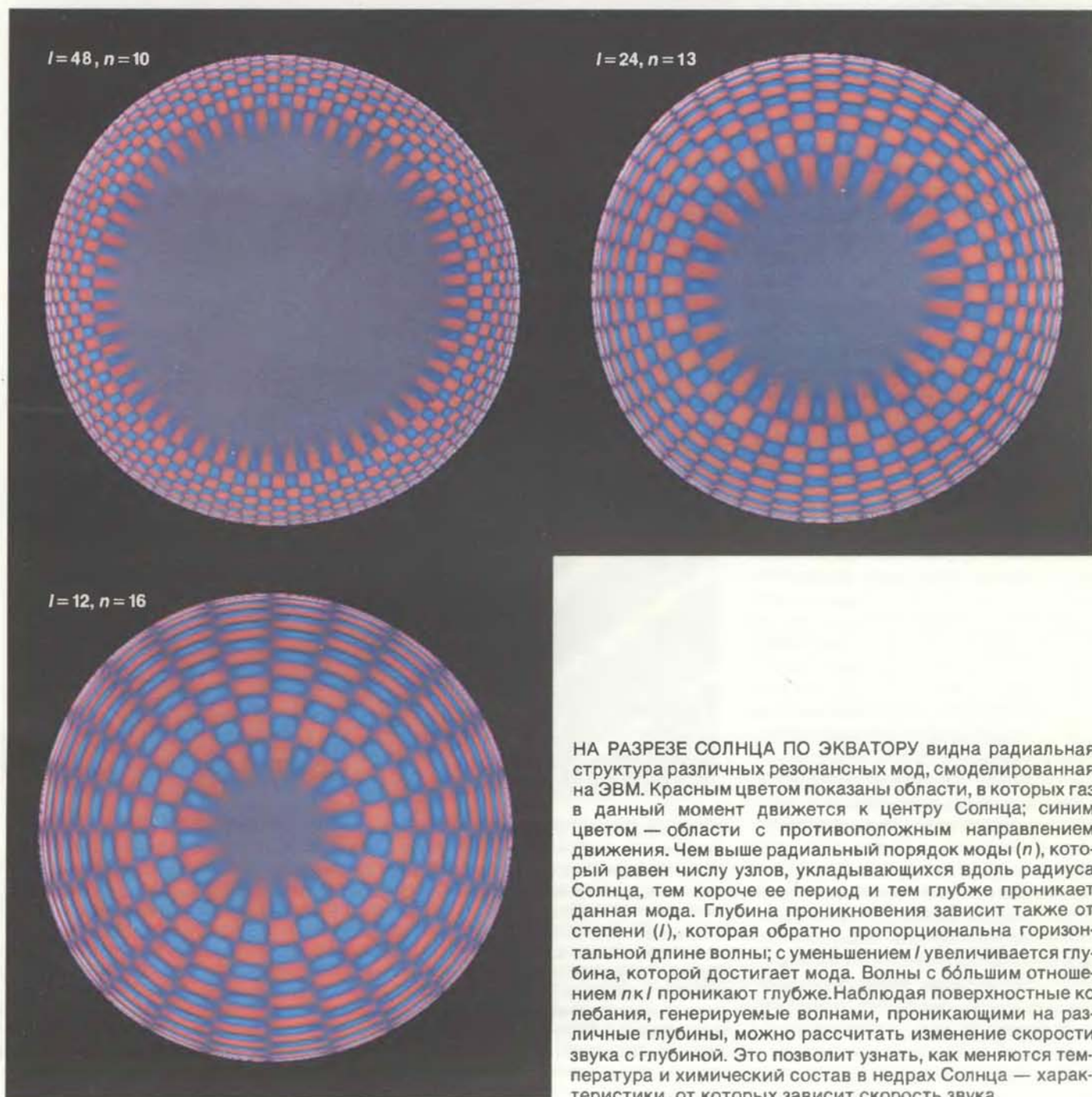
высоких степеней. Для этого надо получить изображение Солнца как звезды, т.е. не в виде диска, а сфокусированным в точку, что достижимо с помощью современных приборов. На изображении будет присутствовать смешанный свет от всего солнечного диска. При таких наблюдениях многочисленные моды высоких степеней почти невидимы. Их длины волн малы по сравнению с размерами солнечного диска, и поэтому усредненное по диску доплеровское смещение спектральных линий незначительно. Напротив, моды с l , равной 0, 1, 2 или 3, вызывают радиальные движения, которые находятся в фазе на всем или почти на всем солнечном диске. При этом возникает доплеровское смещение, которое можно зарегистриро-

вать. Результирующий частотный энергетический спектр имеет гораздо более простой вид, чем в случае мод высоких степеней. Это дает возможность изучать отдельные моды вместо их суперпозиции, когда разрешение отдельных мод невозможно.

К сожалению, скорость отдельной моды на поверхности мала, поэтому для регистрации производимой этой модой доплеровского смещения необходим очень точный и стабильный спектрометр. Наиболее достоверные результаты дают специальные газовые спектрометры, в которых сравниваются линии поглощения в спектре лабораторного газообразного натрия или калия с линиями поглощения, обусловленными движением на поверхности Солнца атомов этих эле-

ментов. Специальные газовые спектрометры были успешно использованы двумя группами ученых. Одна группа под руководством Дж. Айзека и Г. ван дер Раая проводит исследования в Бирмингемском университете, другая, возглавляемая Э. Фосса и Ж. Греком, работает в Обсерватории Нишсы.

Первые наблюдения солнечных колебаний низких степеней показали, что периоды и, следовательно, частоты у большинства мод тесно сгруппированы. Чтобы различить их, необходимы наблюдения в течение длительного времени (моды с очень близкими частотами должны успеть сблизиться по фазе друг с другом и затем разойтись). Одного 12-часового дня наблюдений недостаточно. В то же время



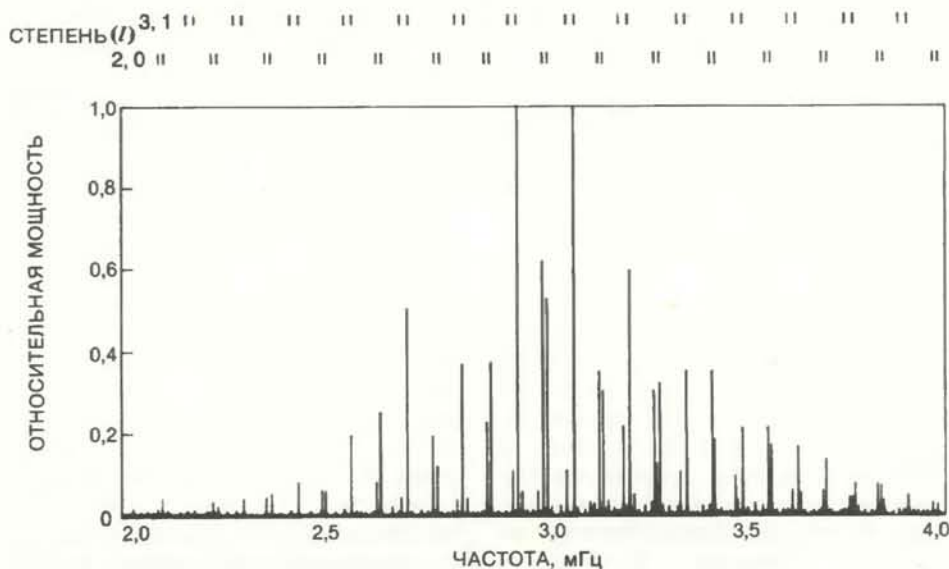
НА РАЗРЕЗЕ СОЛНЦА ПО ЭКВАТОРУ видна радиальная структура различных резонансных мод, смоделированная на ЭВМ. Красным цветом показаны области, в которых газ в данный момент движется к центру Солнца; синим цветом — области с противоположным направлением движения. Чем выше радиальный порядок моды (n), который равен числу узлов, укладываемых вдоль радиуса Солнца, тем короче ее период и тем глубже проникает данная мода. Глубина проникновения зависит также от степени (l), которая обратно пропорциональна горизонтальной длине волны; с уменьшением l увеличивается глубина, которой достигает мода. Волны с большим отношением nk/l проникают глубже. Наблюдая поверхностные колебания, генерируемые волнами, проникающими на различные глубины, можно рассчитать изменение скорости звука с глубиной. Это позволит узнать, как меняются температура и химический состав в недрах Солнца — характеристики, от которых зависит скорость звука.

при многодневных наблюдениях отсутствие данных в ночное время порождает много ложных частот. Чтобы избавиться от этой неприятности, группа из Ниццы отправилась на Южный полюс. «Южным» летом 1979 г. физики в течение пяти дней производили непрерывные наблюдения. Проанализировав свои данные и построив энергетический спектр, они увидели пары хорошо различимых пиков, почти равномерно распределенных по всему спектру.

Сравнивая эти результаты с частотами колебаний низких степеней, предсказываемыми теорией, Й. Кристенсен-Далсгаард из Университета в Орхусе (Дания) и Д. Гаф показали, что каждая пара частот соответствует паре мод с увеличивающимся оборотным числом (n) и уменьшающейся степенью (l): либо 3 и 1, либо 2 и 0. По всему спектру пары с нечетными l чередовались с парами с четными l . Теория предсказывает, что если бы были зарегистрированы моды более высокой степени, то они расположились бы точно в такой же последовательности. Было обнаружено, что разность частот внутри каждой пары приблизительно соответствует величине, предсказываемой стандартной солнечной моделью, согласно которой гелий, образовавшийся в результате термоядерного синтеза в ядре Солнца, остается сконцентрированным вблизи самого центра Солнца, а не перемешивается по всему ядру.

Чтобы сократить ночное нерабочее время и получить данные за более длительный срок, чем это позволяет сделать погода на Южном полюсе, группа из Бирмингема расположила одну станцию наблюдений на Канарских островах, а другую — на Гавайях. Поскольку эти станции расположены в разных полушариях (Восточном и Западном) почти на одинаковой долготе, объединенные данные по ним охватывают значительный интервал времени: в 1981 г. одна серия измерений скорости пульсаций всего диска продолжалась приблизительно в течение трех месяцев. Частотный спектр, построенный по этим данным, имеет тот же вид, что и спектры, полученные на Южном полюсе, но обладает более высоким разрешением.

ХАРАКТЕРНЫЙ вид спектра частот, измеренного для мод низких степеней, подтвердил, что теоретические представления о солнечных колебаниях в своей основе верны. Однако измеренные значения частот несколько отличаются от тех, которые предсказываются стандартной солнечной моделью. Расхождение между измеренными и рассчитанными частотами



В ЧАСТОТНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СПЕКТРЕ колебаний низких степеней, полученном из наблюдений доплеровского смещения в свете, идущем от всего солнечного диска, обнаруживаются удивительные закономерности резонансных частот. Каждая из указанных пар линий соответствует колебаниям с увеличивающимся радиальным порядком n и уменьшающейся степенью l . Пары мод с нечетными l чередуются с парами с четными l . Внутри пар частоты мод нечетной степени расщеплены несколько сильнее, чем частоты мод четной степени. Хорошее согласие между этим спектром и теоретическими предсказаниями позволяет определить значения l . Наблюдения проводились на островах Тенерифе и Гавайи Дж. Айзеком и Г. ван дер Рааем из Бирмингемского университета.

не превышает 3%, но даже такое небольшое различие примерно в десять раз больше ошибок измерений. Это различие также значительно больше неопределенности, характерной для расчета частот в рамках стандартной модели. Ясно, что необходимо внести значительные изменения в саму модель.

Возможно, гипотезы о происхождении и эволюции Солнца, отступающие от стандартного подхода, приведут к модели, которая будет лучше согласовываться с наблюдениями. Одна из таких гипотез предполагает, что вследствие неоднородностей в газовом облаке, из которого образовалось Солнце, первоначальные пропорции водорода и гелия в недрах Солнца отличались от пропорций в поверхностных слоях. Модели, развивающие эту гипотезу, предсказывают несколько иную, чем в стандартной модели, скорость звука в недрах Солнца и, следовательно, иные значения резонансных частот.

Одна такая модель, в которой предполагается значительно более высокое содержание гелия в ядре и более высокая температура ядра, гораздо лучше согласуется с данными по колебаниям, чем стандартная модель. К сожалению, нейтринный поток, предсказываемый этой моделью, выше, чем в стандартной модели, и еще сильнее отличается от измеренного потока нейтрино. Другая модель, предполагающая меньшее содержа-

ние гелия в ядре и более низкую температуру ядра, чем в стандартной модели, дает хорошее согласие с наблюдаемым нейтринным потоком, но расхождение ее предсказаний с измеренными колебаниями еще больше, чем у стандартной модели.

Представляется, что возможные нестандартные модели, в которых допускается первоначальный химический состав, меняющийся с глубиной, не могут согласоваться одновременно и с наблюдаемыми частотами колебаний, и с измеренным потоком нейтрино. Один путь согласования результатов обоих экспериментов с теорией состоит в том, чтобы допустить, что ядро внезапно на короткий момент охладилось. Охлаждение вызвало бы уменьшение нейтринного потока, а благодаря своему кратковременному характеру оказало бы слабое влияние на наблюдаемую светимость Солнца. Так как акустические моды, по видимому, нечувствительны к условиям внутри ядра, аномально низкая температура ядра не привела бы к появлению частот, значительно отличающихся от наблюдаемых. Однако без дополнительной информации о солнечном ядре сказанное остается просто одной из гипотез.

К СЧАСТЬЮ, существует целый класс других резонансных колебаний, которые имеют наибольшую амплитуду вблизи ядра и поэтому чувствительны к условиям внутри его. Это

внутренние гравитационные волны — колебания частиц газообразной среды вверх и вниз относительно положения равновесия. Существование акустических волн обусловлено давлением (эффектами сжимаемости), а гравитационных — силой тяжести (эффектами плавучести). Гравитационные волны могут распространяться только в областях с устойчивой стратификацией вещества. Поэтому они в значительной степени сосредоточены («захвачены») глубоко в недрах Солнца под нестабильной конвективной зоной.

Резонансный период гравитационных волн определяется временем их прохождения через область захвата. Время прохождения в свою очередь зависит от собственной частоты колебаний, связанных с выталкивающей силой, т.е. частоты, с которой колеблется частица среды, первоначально смещенная в вертикальном направлении. Эта частота определяется значениями вертикальных градиентов плотности и давления.

Так как гравитационные волны сосредоточены на большой глубине, их трудно увидеть на поверхности Солнца. Те моды гравитационных волн, которые могли бы проявиться на поверхности в виде вариаций радиальной скорости и яркости, имеют низкую степень; они подвержены наименьшему ослаблению в конвективной зоне. Однако наблюдать эти моды нелегко, так как они имеют малые амплитуды и периоды в 1 ч и более. Кроме того, как предсказывает теория, гравитационные моды весьма многочисленны, а их частоты довольно тесно сгруппированы. Соответственно определение частот внутренних гравитационных волн с точностью, необходимой для изучения внутреннего строения Солнца, требует, чтобы наблюдения проводились в течение нескольких месяцев и даже лет.

Некоторые исследователи сообщили о наблюдении пульсаций, которые могли быть внутренними гравитационными волнами. А. Б. Северный,

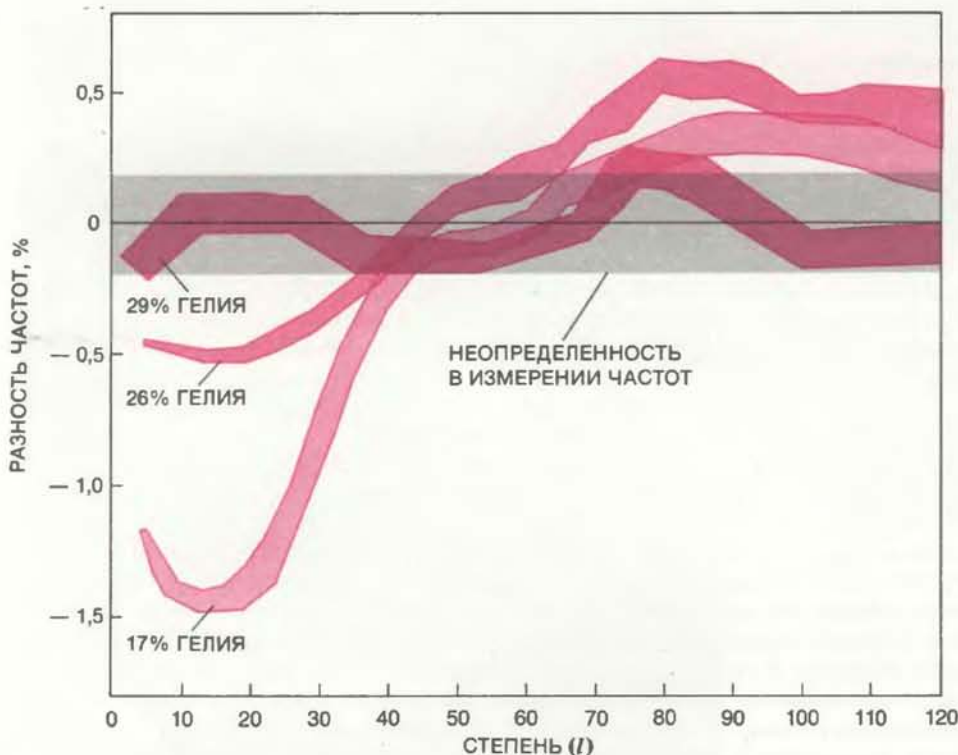
В. А. Котов и их коллеги из Крымской астрофизической обсерватории зарегистрировали колебания с периодом 160,01 мин. Похожую моду обнаружили Ф. Шеррер и Дж. Уилкоккс из Станфордского университета. Удивительно, однако, что при обработке данных была обнаружена только одна мода, а не «частокол» пиков, как предсказывает теория. Поскольку найденный период почти точно равен одной девятой земных суток, можно предположить, что какой-нибудь слабый эффект в земной атмосфере создает ложный осциллирующий сигнал*.

В частотном спектре, полученном сотрудниками Станфордского университета, видны и другие, возможно, гравитационные моды. Теория предсказывает, что периоды гравитационных волн должны быть распределены равномерно. Используя такое предсказание, Ф. Деляш из Обсерватории Ниццы и Ф. Шеррер идентифицировали около десяти мод гравитационных волн с периодами от 3 до 5 ч.

Различие между периодами этих колебаний оказалось немного большим, чем следует из стандартной солнечной модели. Это может свидетельствовать об аномально низкой частоте плавучести в глубоких недрах Солнца.

Возможно, в этой области градиенты плотности и давления меньше, чем считалось до сих пор, — например, из-за перемешивания вещества в ядре в отличие от стандартной солнечной модели. Если это предположение подтвердится, оно будет противоречить выводу об отсутствии перемешивания в ядре, полученному в ходе анализа частотного распределения акустических мод низких степеней. Исследование внутренних гравитационных волн проходит пока период своего становления, хотя и представляется многообещающим методом гелиосейсмологического зондирования солнечного ядра.

БОЛЬШИНСТВО вопросов, для решения которых была использована гелиосейсмология, касались радиальной структуры Солнца (изменения этой структуры с глубиной). Гелиосейсмология служит также мощным инструментом изучения горизонтальных движений под поверхностью Солнца. Такие движения вызываются вращением Солнца и крупномасштаб-



РАСХОЖДЕНИЕ МЕЖДУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И ТЕОРИЕЙ зависит от того, какая величина содержания гелия в недрах Солнца принята в модели. Кривые показывают расхождение между измеренными и рассчитанными частотами солнечных колебаний в зависимости от степени моды (l) при постоянном радиальном порядке ($n = 13$). Кривые соответствуют частотам, предсказанным различными моделями; при этом предполагается, что содержание гелия на поверхности равно наблюдаемому, а содержание его в недрах Солнца может быть таким, как указано на рисунке. Модель 1 (26% гелия) предполагает, что гелий был равномерно распределен в газовом облаке, из которого образовалось Солнце. Модель 2 (17%) и модель 3 (29%) допускают неоднородность газового облака. Ширина каждой кривой отражает неопределенность в расчете колебаний на поверхности Солнца; горизонтальная серая полоса обозначает ошибки измерений. Модель с высоким содержанием гелия лучше согласуется с данными по колебаниям, но дает гораздо больший по сравнению с измеренным поток солнечных нейтрино. Модель с низким содержанием гелия решает нейтринную проблему, но противоречит наблюдениям пульсаций. Для расчетов использовались теоретические работы Р. Ульриха и наблюдения Т. Дьюелла и Дж. Гарвея.

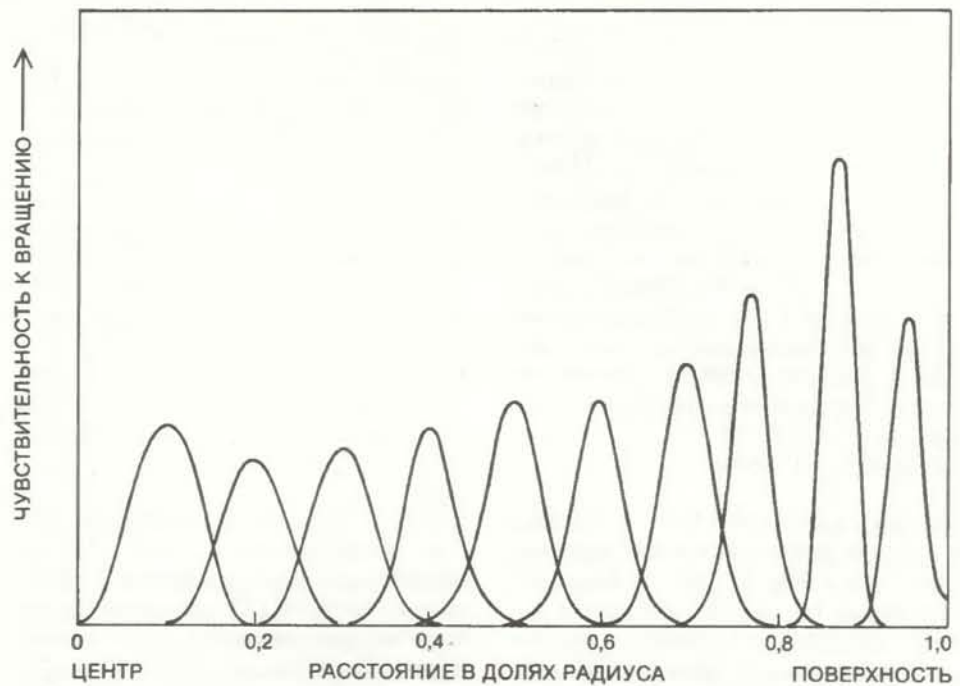
* Ряд исследований А. Б. Северного с сотрудниками и их зарубежных коллег посвящен специально доказательству солнечной природы 160-минутных колебаний. Подробнее см. в статьях А. Б. Северного из библиографии (с. 83). — Прим. ред.

ной конвекцией. Знание изменений скорости вращения Солнца с глубиной и широтой, а также ясное представление о структуре подповерхностных потоков необходимы для понимания сложной динамики конвективной зоны. Они могут также помочь в изучении взаимодействия солнечного вращения и конвекции, в результате которого генерируются магнитные поля Солнца и других звезд.

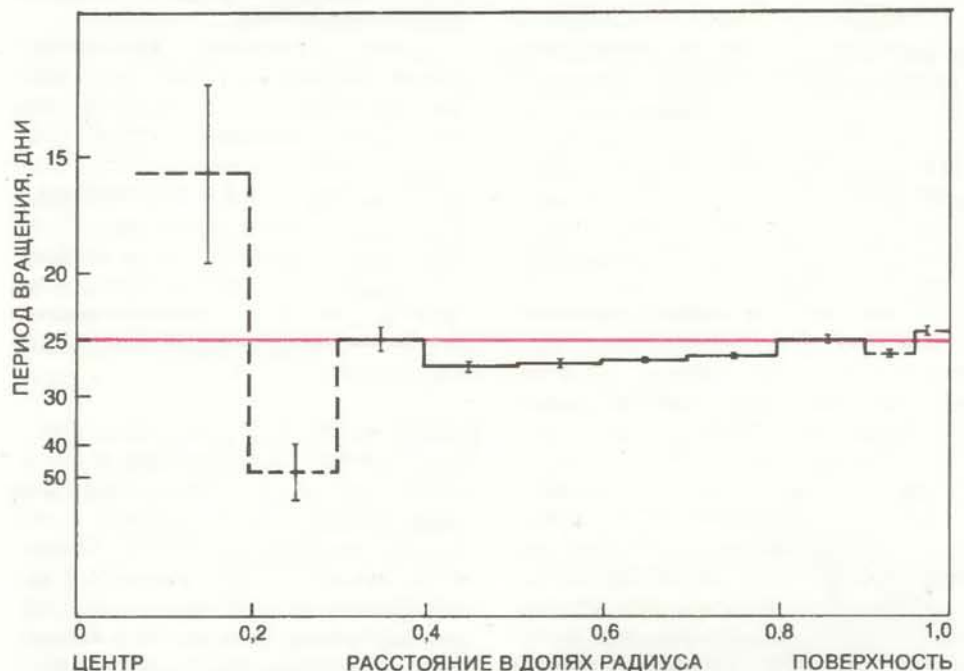
Акустические волны чувствительны к горизонтальным движениям газа под поверхностью Солнца просто потому, что движущийся газ стремится увлечь волны за собой. Волны, распространяющиеся в направлении подповерхностного движения газа, будут двигаться быстрее, чем в неподвижной среде. Следовательно, гребни волн пройдут через фиксированную точку быстрее, а их измеренная частота будет выше. Аналогично у волн, распространяющихся против движения газа, измеренная частота будет меньше. Таким образом, частоты двух идентичных мод, распространяющихся в противоположных направлениях через подповерхностный поток, будут расщеплены. Из величины расщепления можно получить скорость потока, усредненную по той области глубин и широт, где сосредоточены эти моды. Одновременно рассматривая расщепление частот для многих мод, можно получить картину дифференциального вращения Солнца и его крупномасштабных конвективных движений.

Предполагается, что наибольшие из конвективных структур, известные как гигантские ячейки, имеют форму бананов, вытянутых с севера на юг, и расположены бок о бок в конвективной зоне; их ширина должна быть сравнима с глубиной конвективной зоны (200 тыс. км). Хотя такие гигантские ячейки не наблюдались непосредственно, их существование было предсказано П. Гилменом из Национального центра атмосферных исследований в Боулдере и Г. Глатцмайером из Лос-Аламосской национальной лаборатории, выполнившими расчеты солнечной конвекции. На существование гигантских ячеек указывает и крупномасштабная структура магнитного поля, наблюдаемая на солнечной поверхности.

Предполагается, что горизонтальные потоки в гигантских ячейках под видимой поверхностью Солнца являются наиболее сильными. Следовательно, можно наблюдать смещения частот акустических мод, распространяющихся через гигантские ячейки. Вероятно, эти смещения в основном проявляются у мод высоких степеней, имеющих малую (по сравнению с размерами ячеек) горизонтальную длину волны. Величина расщепления частот



ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ колебаний, наблюдаемых на поверхности Солнца, к вращению его внутренних областей зависит от глубины. Метод, по которому внутреннее вращение вычисляется по данным измерений поверхностных пульсаций, относится к теории решения обратных задач. Он предполагает объединение данных по большому числу мод, которые чувствительны к условиям в различных, но частично перекрывающихся интервалах глубин. Такой метод часто используется при определении и других характеристик солнечных недр. Его разрешение по глубине улучшается с увеличением числа рассматриваемых мод. На рисунке ширина пиков указывает на точность, с которой рассчитанная скорость вращения может быть привязана к определенной глубине. Расчеты выполнены Й. Кристенсенем-Далсгаардом из Университета в Орхусе (Дания) и Д. Гафом из Кембриджского университета.



ВНУТРЕННЕЕ ВРАЩЕНИЕ Солнца определялось по разности частот идентичных мод, распространяющихся в противоположных направлениях. Моды наименее чувствительны к вращению вблизи ядра и вблизи поверхности. Штриховая линия указывает на большую неопределенность анализа, а вертикальные отрезки обозначают ошибки измерений. Красная линия отвечает периоду вращения поверхности на экваторе. Данные свидетельствуют о том, что вдоль большей части солнечного радиуса скорость вращения медленно падает с глубиной, а не растет, как считалось ранее. Однако ядро может вращаться быстрее, чем остальная часть Солнца. Наблюдения были проведены Т. Дьювеллом и Дж. Гарвеем и проанализированы ими же в сотрудничестве с В. Джембовским из Астрономического центра им. Коперника (Польша). Ф. Гудом из Технологического института шт. Нью-Джерси, Д. Гафом и Дж. Лейбахером.

должна увеличиваться и уменьшаться в течение нескольких дней, по мере того как гигантские ячейки при вращении Солнца попадают в поле зрения на видимом диске и выходят из него. Ф. Хилл и Л. Новембер из Национальной солнечной обсерватории Сакраменто-Пик в Санспоте (шт. Нью-Мексико), работающие вместе с Гафом и Тумре, зарегистрировали такие вариации в расщеплении частот. Из их наблюдений можно сделать вывод о том, что горизонтальная скорость циркуляции в гигантских ячейках достигает более 100 м/с у самой поверхности Солнца.

ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ «проявила себя» и при исследовании внутреннего вращения Солнца. Полагают, что когда-то Солнце вращалось гораздо быстрее, чем сейчас: в настоящее время период вращения Солнца составляет около 25 дней на экваторе и около 33 дней вблизи полюсов. На поверхности момент количества движения передается солнечному ветру — разлетающемуся от поверхности газу, но в недрах Солнца момент количества движения не теряется. Ожидается, что в глубоких недрах Солнца, куда конвективные потоки не могут проникнуть и вызвать перераспределение момента количества движения, вращение может быть более быстрым.

Недавно Т. Дьювелл-младший из Годдардовского центра космических полетов Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) и Дж. Гарвей из Национальной солнечной обсерватории в Тусоне наблюдали расщепление частот акустических мод, обусловленное вращением Солнца. Из анализа результатов видно, что скорость вращения медленно уменьшается по направлению к центру Солнца, однако данные показывают, что само ядро может вращаться быстрее, чем остальная часть Солнца. Так как акустические волны не очень чувствительны к условиям внутри ядра, результаты, относящиеся к ядру, нельзя считать надежными. Но сравнительно медленное вращение на глубинах, расположенных ближе к поверхности, установлено достаточно надежно, что противоречит оценкам, основанным на потерях момента количества движения в поверхностных слоях. Новые наблюдения Т. Брауна из Национального центра атмосферных исследований еще более усложнили проблему. Они показали, что под поверхностью скорость вращения почти не зависит от широты — в отличие от того, что наблюдается на поверхности. Оба результата ставят серьезные вопросы перед динамическими моделями Солнца.

Теория, которая подтверждается данными гелиосейсмологии, — это теория гравитации Эйнштейна. Известно, что перигелий (ближайшая к Солнцу точка орбиты) орбиты Меркурия прецессирует, несколько смещаясь при каждом полном обороте. Частично эту прецессию можно объяснить гравитационными возмущениями других планет. Триумф теории Эйнштейна состоял, в частности, в том, что она смогла объяснить избыточную прецессию перигелия Меркурия как результат искривления пространства-времени под влиянием сильного гравитационного поля Солнца.

Такое объяснение предполагает, что гравитационное поле Солнца сферически-симметрично. Если внутренняя структура Солнца искажается при быстрым вращении, как предположил Р. Дикке из Принстонского университета, то сплюснутость у полюсов также будет давать вклад в прецессию, и тогда теория Эйнштейна должна быть модернизирована. Действительно, Г. Хилл с коллегами из Университета шт. Аризона зарегистрировали флуктуации яркости на краях солнечного диска, которые они отнесли на счет различных акустических и гравитационных волн. Исследователи пришли к выводу о быстром вращении внутренних областей Солнца и необходимости модификации теории гравитации.

Однако расщепление акустических частот дает такие значения для скорости вращения внутренних областей, которые не приводят к сплюснутости, вызывающей необходимость пересмотра эйнштейновской поправки к прецессии. Даже если само ядро Солнца вращается быстро, более медленное вращение остальной части недр означает, что полное влияние вращения на гравитационный потенциал Солнца мало.

ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ уже дала существенную информацию о внутренней структуре Солнца, однако для эффективного использования этого метода необходимы более точные наблюдения. Чтобы разделить моды колебаний с очень близкими частотами, требуются непрерывные наблюдения в течение нескольких месяцев или лет. Для этого необходимо расположить сеть обсерваторий на разной долготе по всему земному шару так, чтобы в каждый момент по крайней мере одна из этих обсерваторий могла наблюдать за Солнцем в условиях хорошей видимости. Группы из Бирмингема и Ниццы уже построили такие сети обсерваторий для исследования Солнца как звезды. Специалисты в области физики Солнца из Национальной оптической астрономической

обсерватории планируют создать мировую сеть телескопов для регистрации мод со степенью 100 и больше.

Необходимы также более совершенные данные по колебаниям гораздо более высоких степеней. Они позволяют получить наиболее точную информацию о структуре и горизонтальных потоках конвективной зоны. Поскольку такие колебания производят небольшие горизонтальные смещения, для их изучения необходимо хорошее пространственное разрешение. Этого легко достичь, если выйти за пределы земной атмосферы, турбулентность которой сильно искажает тонкие детали на диске Солнца. Спутник, предназначенный для измерения мелкомасштабного распределения скоростей на поверхности Солнца, лучше всего вывести на орбиту вблизи внутренней точки Лагранжа — точки гравитационного равновесия между Землей и Солнцем. Внутренняя точка Лагранжа имеет очень малую радиальную скорость относительно Солнца, поэтому спутник сможет измерить распределение скоростей по поверхности Солнца с очень большой точностью. Такое положение также удовлетворяет требованию непрерывности наблюдений, так как внутренняя точка Лагранжа постоянно освещается Солнцем.

Спутник с детектором на борту для изучения солнечных пульсаций может быть запущен в 90-х годах в рамках совместной программы исследований НАСА и Европейского космического агентства (ESA). Этот проект, а также сеть наземных обсерваторий позволят исследователям приблизиться к границам возможностей гелиосейсмологии как метода изучения солнечных недр.

SCIENTIFIC AMERICAN

СЕНТЯБРЬ 1935 г. Каково происхождение космических лучей? Если их генерация идет непрерывно, наблюдаемое изотропное распределение свидетельствует о том, что большая их часть зарождается в далеких галактиках или по крайней мере в удаленных областях космического пространства. Из множества гипотез о происхождении космических лучей пока ни одна не получила экспериментального подтверждения, чтобы считаться общепринятой. Однако целый ряд теорий не может быть отвергнут. Наиболее яркими среди них являются гипотеза Леметра о «сверхрадиоактивных частицах», рождаемых во время первоначального взрыва в его модели расширяющейся Вселенной, теория Сванна об ускорении заряженных частиц вихревыми электрическими полями, индуцируемыми в магнитных «солнечных пятнах» звезд-гигантов, а также предположение, высказанное Милном о том, что энергия частиц обусловлена гравитационным сжатием Вселенной.

Новый прибор для химического анализа состава почвы изобретен в Гонолулу. Он поможет экономить время и повысить урожай благодаря более правильному внесению удобрений в почву. Трудоемкие анализы, на которые раньше уходило недели, с использованием нового метода будут выполняться всего за несколько минут. Теперь можно будет составлять план внесения необходимых удобрений на каждом участке поля и успевать использовать полученные таким образом данные для выращивания урожая текущего года.

Как обнаружено, натрийгексаметафосфат обладает свойствами, которые при добавлении его к мылу облегчают стирку в жесткой воде. Б. Х. Гилмора из Меллоновского института промышленных исследований заинтересовало, каким образом происходит присоединение этой солью ионов кальция и магния. Если удалить эти ионы из раствора без образования осадка, эффект «свертывания» при действии жесткой водой на мыло нейтрализуется, мыло целиком растворяется в воде и его моющие свойства полностью реализуются.

Иногда можно услышать мнение, что экономия топлива на авиалиниях не столь уж важная проблема. Однако

изучение статистических данных за 1934 г. приводит к обратному выводу. Цифры таковы: число перевезенных пассажиров — 537 637 чел.; общая протяженность маршрутов — 42 622 619 миль; количество использованного бензина — 21 991 782 галлона. Таким образом, средний расход топлива составляет 1 галлон на 1,94 мили. Количество пассажиро-миль на галлон — 7,23. Зная стоимость галлона — 11 центов — получаем, что стоимость топлива на одну пассажиро-милю составляет 1,52 цента. Средняя плата на авиалиниях в США — 6 центов за милю. Таким образом, стоимость топлива составляет 25% от платы, взимаемой за билет. Отсюда ясно, что повышение коэффициента использования мотора, равно как и удешевление топлива, принесет авиакомпаниям большую выгоду.

SCIENTIFIC AMERICAN

СЕНТЯБРЬ 1885 г. Вероятно, ни одно событие в истории парусного спорта не привлекало столь пристального внимания публики, как состязание за звание чемпиона между английскими и американскими яхтами близ Нью-Йорка. Команды боролись за приз, завоеванный ранее яхтой "America" в состязаниях с британскими яхтами, проходившими в Англии в 1851 г. Нью-Йоркский яхт-клуб получил этот приз в подарок от владельцев "America" с условием, что он будет периодически разыгрываться. На этот раз состязания между американской яхтой "Puritan" и британской яхтой "Genesta" наконец закончились: победа в обоих гонках дала возможность американцам сохранить у себя приз.

В этом году в Испании и на южном побережье Франции наблюдается сильная вспышка холеры. Сведения, поступающие из мест, пораженных бедствием, говорят о непрерывном распространении болезни и устрашающем числе ее жертв. К счастью, осень уже полностью вступила в свои права, что существенно уменьшает опасность того, что болезнь перекочет через океан в этом году. Однако более чем вероятно, что в будущем году она достигнет берегов Америки, поэтому городским властям и всем жителям следует по-прежнему прилагать все усилия для поддержания чистоты на улицах и в домах.

Согласно законодательному акту, принятому недавно в штате Пенсиль-

вания, мальчиков моложе 14 лет, а также всех девочек и женщин запрещается использовать на работах в угольных шахтах этого штата. Подсчитано, что действие закона распространяется почти на половину сортировщиков (работа, на которую мальчиков иногда берут чуть ли не с шестилетнего возраста), а также значительную часть погонщиков мулов и привратников. Следует сказать, что принятию закона предшествовала многолетняя борьба его сторонников и что вхождение его в силу вызвало немало волнений в «угольных районах» штата. Однако совершенно очевидно, что общество должно позаботиться о том, чтобы малолетние его члены имели возможность учиться и не были обречены на невежество в столь раннем возрасте.

Снижение почтовых расходов и прочие причины вызвали во всем мире резкое увеличение числа почтовых отправлений. Менее чем 50 лет назад каждый житель Великобритании получал в среднем три письма в год, теперь же он получает 37 писем и 4 почтовые открытки. Самые последние достоверные данные для сравнения (на 1882 год, когда для Великобритании среднее число получаемых писем составляло 35) — 21 почтовое отправление для Соединенных Штатов, 17 для Германии, 16 для Франции и 7 для Италии и 5 для Испании.

Г-н Гастон Тиссандьер при участии г-на Дж. Дюкома недавно провел опыты по фотографированию с воздушного шара. Результаты оказались весьма удовлетворительными. Фотоаппарат был закреплен на краю гондолы таким образом, чтобы можно было его поворачивать в нужном направлении и удерживать в вертикальном положении.



Съемка с воздушного шара

Олигосахарины

Обнаружено, что фрагменты стенки растительной клетки участвуют в регуляции роста, развития, размножения растения, в защите его от болезней

ПИТЕР ЭЛБЕРСГЕЙМ, АЛАН Г. ДАРВИЛЛ

ЛЮБОЕ высшее растение образовано множеством клеток, имеющих одинаковый набор генов. Возникает вопрос: каким образом эти клетки могут выполнять различные функции и формировать различные структуры, в результате чего растение имеет корни, стебли, листья, цветки и плоды? Разгадка заключается в том, что в клетках того или иного типа экспрессируется, т.е. «включена», только небольшая часть этих генов. При помощи сложной системы химических медиаторов (посредников) в одних клетках активируются гены, ответственные, например, за образование цветков, а в других — гены, ответственные за развитие корня.

Химические медиаторы растений называются фитогормонами, они являются регуляторными молекулами. Было выделено пять основных типов фитогормонов: ауксины, абсцизовая кислота, цитокинины, этилен и гиббереллины.* В наших исследованиях в растениях обнаружен новый класс регуляторных молекул, которые мы назвали олигосахаридами. По-видимому, каждый олигосахарин передает некий сигнал, регулирующий определенную функцию растения. Среди этих функций — защита от болезней, рост, а также дифференцировка клеток в процессе развития (т.е. указание, какие клетки будут формировать корни, какие — стебли, листья, цветки и плоды).

В отличие от олигосахаридов пять хорошо известных фитогормонов являются, скорее, плейотропными, чем специфичными. Это значит, что каждый из них оказывает многостороннее влияние на рост и развитие растения. Ауксин, например, стимулирует удлинение клеток, заставляет побеги тянуться вверх, а корни — расти вниз,

* Существует несколько ауксинов. Говоря просто «ауксин», имеют в виду индоллил-3-уксусную кислоту. Гиббереллины также многочисленны. Под гиббереллином (в единственном числе) обычно подразумевают гибберелловую кислоту. Цитокинины тоже целая группа веществ. — *Прим. ред.*

а кроме того, подавляет развитие боковых побегов. Он также побуждает растение к образованию другого гормона — этилена, к развитию сосудистой системы и росту боковых корней. Четыре других гормона тоже выполняют сложные комплексы функций. В результате они приводят одновременно к стольким эффектам, что коммерческая ценность их в сельском хозяйстве невелика: одни эффекты выгодны, а другие нежелательны с производственной точки зрения. Так, один и тот же гормон может вызывать одновременно и мобилизацию растением накопленных запасов, что полезно в растениеводстве, и сбрасывание листьев, что совершенно ни к чему.

Плейотропия пяти растительных гормонов во многом аналогична множественному эффекту, свойственному некоторым гормонам животных, стимулирующим эндокринные железы к выделению ряда других гормонов. К примеру, гормоны одного из отделов мозга — гипоталамуса — стимулируют переднюю долю гипофиза, которая начинает синтезировать и выделять собственные гормоны, в том числе кортикотропин. Кортикотропин в свою очередь вызывает секрецию нескольких гормонов коры надпочечников. Прочие гормоны передней доли гипофиза также оказывают специфичное действие на органы-мишени. Один из гормонов, в частности, стимулирует щитовидную железу, другой — фолликулярные клетки яичников и т.д. Иными словами, наблюдается иерархия гормонов. Мы считаем, что такая иерархия может существовать и у растений.

Олигосахариды — это фрагменты клеточной стенки; они высвобождаются из нее при помощи ферментов, причем разные олигосахариды «обслуживаются» разными ферментами. Есть данные, указывающие на то, что такие плейотропные гормоны растений, как ауксин и гиббереллин, в действительности являются активаторами ферментов, высвобождающих из клеточной стенки более специфичные медиаторы — олигосахариды.

ОТКРЫТИЕ олигосахаридов явилось прямым следствием того, что в течение многих лет наша лаборатория в Колорадском университете в Боулдере вела исследования одновременно в двух направлениях, которые, как нам казалось, не имели друг к другу никакого отношения. Первое из них ставило задачу детального изучения структуры стенки растительной клетки. Необычайная сложность компонентов клеточной стенки растений навела на мысль о том, что они могут выполнять не только структурные функции. Вторым направлением было исследование веществ, участвующих в защите растения от болезнетворных агентов. Из этой работы непосредственно следовало, что клеточная стенка ведет себя как железа, служа хранилищем определенного класса регуляторных молекул, которые, выделяясь из нее, способны контролировать целый ряд функций растения.

Растительные клетки отличаются характерной полужесткой оболочкой — клеточной стенкой. Одна из ее функций — механическая: благодаря стенке клетка (а в конечном счете и растение в целом) обладает прочностью и определенной формой. Клеточная стенка находится снаружи от плазматической мембраны, которая химически определяет собой границу цитоплазмы. Она проницаема для большинства веществ; проницаемость лежащей под ней мембраны строго избирательна, что позволяет ей контролировать поступление в клетку метаболитов и выход из нее компонентов клеточной стенки и других синтезируемых в цитоплазме химических соединений. Так называемая первичная стенка молодой клетки тонкая и способна к быстрому росту в ширину. Под ней формируется вторичная стенка, которая в зрелой прекратившей рост клетке гораздо толще первичной и может принимать более сложную форму, чем первичная стенка, которая обычно просто окружает клетку наподобие коробки.

Мы изучаем первичные стенки, которые почти целиком (примерно на 90%) состоят из полисахаридов —

крупных полимерных молекул, мономерами которых являются молекулы простых сахаров, или моносахаридов. Остальные 10% клеточной стенки приходится на долю белков. Большинство моносахаридов, входящих в состав стенки, относится к пентозам либо к гексозам, т.е. включают соответственно 5 либо 6 атомов углерода.

Больше всего в клеточной стенке содержится D-глюкозы, которая вообще представляет собой самый распространенный в природе сахар. (Перед названиями моносахаридов часто стоят буквы D или L. В случае глюкозы и других гексоз они обозначают пространственную ориентацию химических группировок, связанных с пятым атомом шестиатомного углеродного скелета. В первичной клеточной стенке большинство сахаров присутствует только в одной из двух возможных конфигураций, поэтому названия моносахаридов здесь можно писать без этой приставки.) Структу-

ра глюкозы типична для всех обнаруженных в клеточной стенке моносахаридов. В водном растворе молекула глюкозы может существовать в виде линейной цепочки из шести атомов углерода, но гораздо чаще она принимает форму замкнутого кольца (1-й и 5-й атомы углерода соединены через атом кислорода). В кольцевой форме 1-й атом углерода связан, кроме того, с атомом водорода и гидроксильной группой (—ОН). Возможны два варианта такого кольца, различающиеся взаимоположением водорода и гидроксильной группы у 1-го углеродного атома; их обозначают α и β . В растворе форма открытой цепочки и α - и β -циклические формы непрерывно переходят одна в другую.

В МОЛЕКУЛАХ полисахаридов и олигосахаридов (олигосахариды — это небольшие полисахариды, в состав которых входит от 2 до 15 мономеров) моносахариды соединены друг

с другом характерной связью, называемой гликозидной. Эта ковалентная связь (т.е. связь, в которой атомы имеют общие электронные пары) возникает, когда 1-й углеродный атом одной молекулы сахара, находящейся в циклической форме, соединяется с занимающим иное положение углеродным атомом другой молекулы сахара. Из гидроксильных групп при атомах углерода, участвующих в образовании гликозидной связи, образуется молекула воды и остается атом кислорода, соединяющий два моносахарида.

Поскольку атомы кислорода и водорода, связанные с 1-м углеродом моносахарида, могут быть ориентированы двумя различными способами — α или β , возможны α - и β -гликозидные связи. Хотя на первый взгляд разница между этими двумя типами связи невелика, одинаковые мономеры могут дать два совершенно разных по свойствам полисахарида



ЦВЕТКИ РАСТУТ ИЗ КУСОЧКА СТЕБЛЯ (эксплантата) табака, помещенного в жидкую культуральную среду. В каждой цветке имеется центрально расположенная завязь, окруженная пятью тычинками и несколькими недоразвитыми лепестками и чашелистиками. Авторы статьи и их коллеги вызывали образование цветков на эксплантатах, добав-

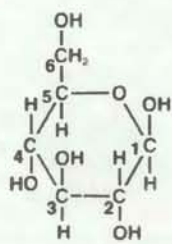
ляя в среду недавно открытые ими вещества, называемые олигосахаридами. Эти вещества представляют собой олигосахариды — короткие цепочки из молекул простых сахаров, являющиеся фрагментами полисахаридов клеточной стенки. Они действуют как гормоны, участвуя в регуляции функций растения.

в зависимости от того, соединены они α - или β -связью. Например, две молекулы глюкозы, связанные α -гликозидным мостиком между 1-м и 4-м углеродными атомами, образуют дисахарид мальтозу. Если таким образом соединено много молекул глюкозы, получается полисахарид крахмал. Две молекулы глюкозы, связанные в том же положении β -гликозидной связью, образуют целлобиозу; соответствующий полисахарид называется целлюлозой. Целлюлоза идентична крахмалу по химическому составу, но свойства их сильно различаются.

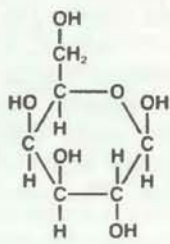
Целлюлоза — наиболее известный полисахарид клеточной стенки и роль ее наиболее понятна. Целлюлоза представляет собой глюкановую цепочку (т.е. цепочку, состоящую только из молекул глюкозы), мономеры которой соединены β -гликозидными связями между 1-м и 4-м углеродными атомами. Эта цепь имеет линейный характер. В первичной стенке отдельные молекулы целлюлозы образуют агрегаты — волокна, называемые микрофибриллами; в составе каждого волокна около 40 цепей. Основная функция целлюлозных микрофибрилл — придать клетке прочность.

Они погружены, наподобие стальных каркасных прутьев в железобетоне, в матрикс — своего рода «цемент», состоящий из других молекул, большинство из которых также относится к полисахаридам.

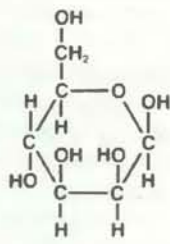
Матрикс первичной клеточной стенки, как правило, включает не менее восьми различных полисахаридов, шесть из которых на сегодняшний день идентифицированы. Это — гомогалактуронан, рамногалактуронан-I и рамногалактуронан-II, ксилоглюкан, арабиногалактан и глюкуронарабиноксилан. Все они получили названия по основным из входящих в их состав моносахаридов. В частности, в рамногалактуронане-II преобладают рамноза и галактуроновая кислота, но помимо них этот полисахарид включает еще по крайней мере восемь других сахаров.



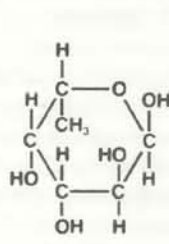
D-ГЛЮКОЗА



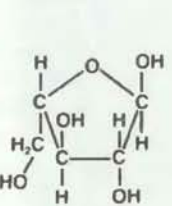
D-ГАЛАКТОЗА



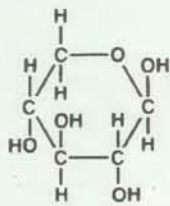
D-МАННОЗА



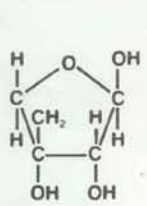
L-ФУКОЗА



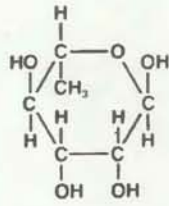
L-АРАБИНОЗА



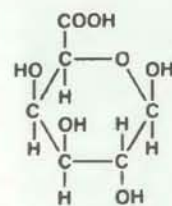
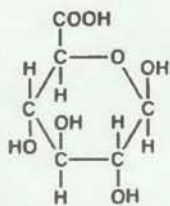
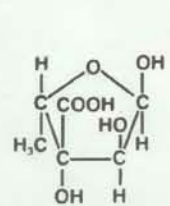
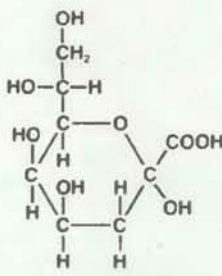
D-КСИЛОЗА



D-АПИОЗА



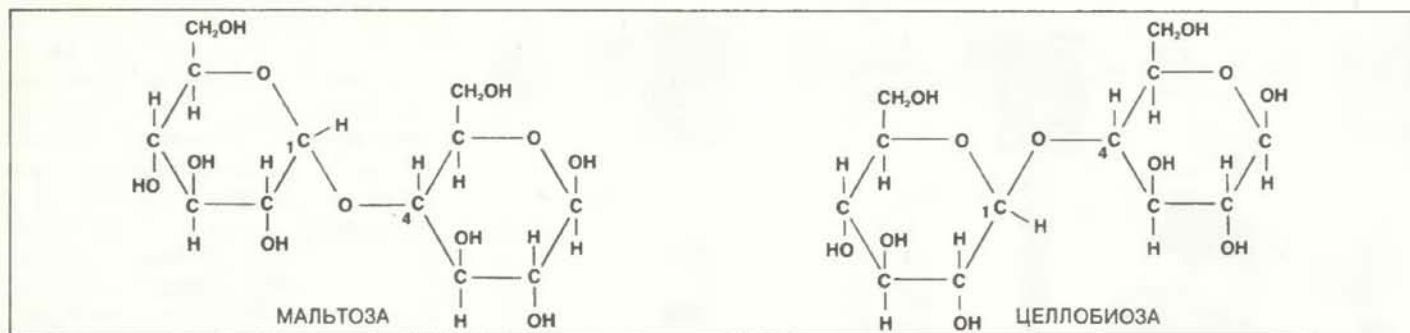
L-РАМНОЗА

D-ГАЛАКТУРОНОВАЯ
КИСЛОТАD-ГЛЮКУРОНОВАЯ
КИСЛОТАL-АЦЕРОВАЯ
КИСЛОТА3-ДЕЗОКСИ-D-МАННО-
ОКТУЛОЗОНОВАЯ
КИСЛОТА (KDO)

МОНОСАХАРИДЫ, входящие в состав первичной клеточной стенки растений. Молекулы изображены схематически — атомы кольца лежат в одной плоскости. D-Глюкоза, D-галактоза и D-манноза являются стереоизомерами, различающимися только положением химических групп при углеродных атомах кольца. В L-фукозе и L-рамнозе нет гидроксильной группы (OH) у 6-го углеродного атома. Эти пять сахаров содержат по 6 атомов углерода и называются гексозами. L-Арабиноза, D-ксилоза и D-апиоза — пентозы, т.е. содержат по 5 атомов углерода; 3-дезоксид-D-маннооктулозоновая кислота (KDO) — 8; остальные приведенные вещества — по 6. В молекулы D-галактуроновой, D-глюкуроновой и L-ацеровой кислот, а также KDO входит карбоксильная группа (COOH), следовательно, эти углеводы обладают свойствами кислоты. Обозначения D и L указывают на положение химических групп, связанных с определенным углеродным атомом — пятым у гексоз, четвертым у пентоз и шестым у KDO. Показано, что в первичной клеточной стенке каждый сахар присутствует только в одной из конфигураций — либо D, либо L. То, что L-ацеровая кислота и KDO входят в состав первичной стенки, было обнаружено лишь недавно с помощью нового управляемого ЭВМ оборудования и специфических ферментов.

До самого последнего времени считалось, что полисахариды матрикса в большей или меньшей степени похожи по своей структуре на целлюлозу и представляют собой простые с химической точки зрения наборы молекул сахаров, связанных между собой в определенном, предсказуемом, легко устанавливаемом порядке. Однако на самом деле они оказались устроенными значительно сложнее. В то время как целлюлоза состоит из идентичных мономеров, соединенных одинаковыми связями, полисахариды матрикса образованы двумя или более типами моносахаридов, связанными гликозидными мостиками различного типа. Две молекулы гексозы (например, глюкозы) могут быть соединены 64 различными способами, а для трех разных моносахаридов будет более 1000 способов! Поскольку одна полисахаридная молекула может включать сотни и тысячи моносахаридов, число различных потенциально возможных структур достигает астрономической цифры — неизвестно только, какие из них могут возникнуть при ограничениях, накладываемых реальными условиями. Сложность структуры полисахаридов клеточной стенки часто еще более увеличивается в результате присоединения неуглеводных компонентов, в частности нередко образуются эфирные связи с метильными группами и сложноэфирные связи с метильными или ацетильными группами.

Нам удалось понять масштабы и значение этой сложности благодаря применению новой технологии. Мы разрушали клеточную стенку различными ферментами, которые высвобождали из нее определенные полисахариды, а затем эти полисахариды анализировали с помощью самого



ГЛИКОЗИДНАЯ СВЯЗЬ характерна для полисахаридов. Так соединены в них мономеры, которыми являются молекулы простых сахаров. Связь образуется между первым углеродным атомом одного моносахарида и определенным углеродным атомом другого. Из OH-групп при этих углеродных атомах образуется молекула воды, и два мономера оказываются связанными через оставшийся атом кислорода. Существуют два варианта гликозидной связи — α и β , поскольку водородный атом и гликозидный кислород при первом углероде могут быть ориентированы

двумя разными способами. Свойства образующегося дисахарида зависят не только от положения углеродных атомов, участвующих в создании гликозидной связи, но и от типа (α или β) этой связи. Так, две молекулы глюкозы, связанные α -гликозидным мостиком между первым и четвертым углеродными атомами, образуют дисахарид мальтозу (слева); поли [(α 1 — 4) глюкоза] — это крахмал. Если же они в том же положении соединены β -гликозидной связью, то получается другой дисахарид — целлобиоза (справа). Поли [(β 1 — 4) глюкоза] — это целлюлоза.

современного хроматографического и спектрометрического оборудования, работа которого управлялась ЭВМ. Такая методика дала возможность выявить ранее не доступные для исследования структурные особенности компонентов клеточной стенки. В частности, недавно мы обнаружили, что в ее состав входят два «новых» растительных моносахарида: ацеровая кислота и 3-дезоксид-маннооктулозоновая кислота, или сокращенно KDO.

Было показано, что оба этих соединения являются минорными компонентами рамногалактуронана-II, структура которого может иллюстрировать высокую сложность строения полисахаридов клеточной стенки. Рамногалактуронан-II составляет примерно 3% вещества первичной стенки в клетках двудольных растений (растения группы двудольных имеют широкие листья с сетчатым жилкованием); в небольшом количестве он присутствует и у однодольных (растения этой группы имеют узкие листья с параллельными жилками), а также у голосеменных (класс растений, к которому относятся хвойные деревья).

Мы выделили рамногалактуронан-II, обработав первичную стенку культивируемых клеток платана специфичным полисахаридыщепляющим ферментом. Он переводит в раствор около 15% клеточной стенки, в том числе весь содержащийся в ней рамногалактуронан-II. Затем мы очистили этот полисахарид, удалив все посторонние примеси, и установили, что в его состав входят 10 разных сахаров, молекулы которых соединены по крайней мере двадцатью способами α - и β -связями между различными по положению углеродными атомами. Мы определили также, что в мо-

лекуле рамногалактуронана-II примерно 65 моносахаридных элементов. На сегодняшний день нами исследовано пять олигосахаридов, которые вместе включают большую часть этих 65 мономеров. Исследование остальных компонентов молекулы еще продолжается. В дальнейшем предстоит изучить, каким образом они располагаются относительно друг друга и какова полная структура полимера.

Рамногалактуронан II, пожалуй, самый сложный из всех полисахаридов, строение которых установлено к настоящему времени. Обнаружено, что это вещество входит в состав всех изученных типов клеточных стенок растений. Естественно спросить — почему? Почему для полисахаридов матрикса клеточной стенки вообще характерна сложная структура, столь отличная от структуры целлюлозы? Почему они, по-видимому, несут гораздо больше химической информации, чем требуется для того, чтобы просто обеспечить растению необходимую прочность?

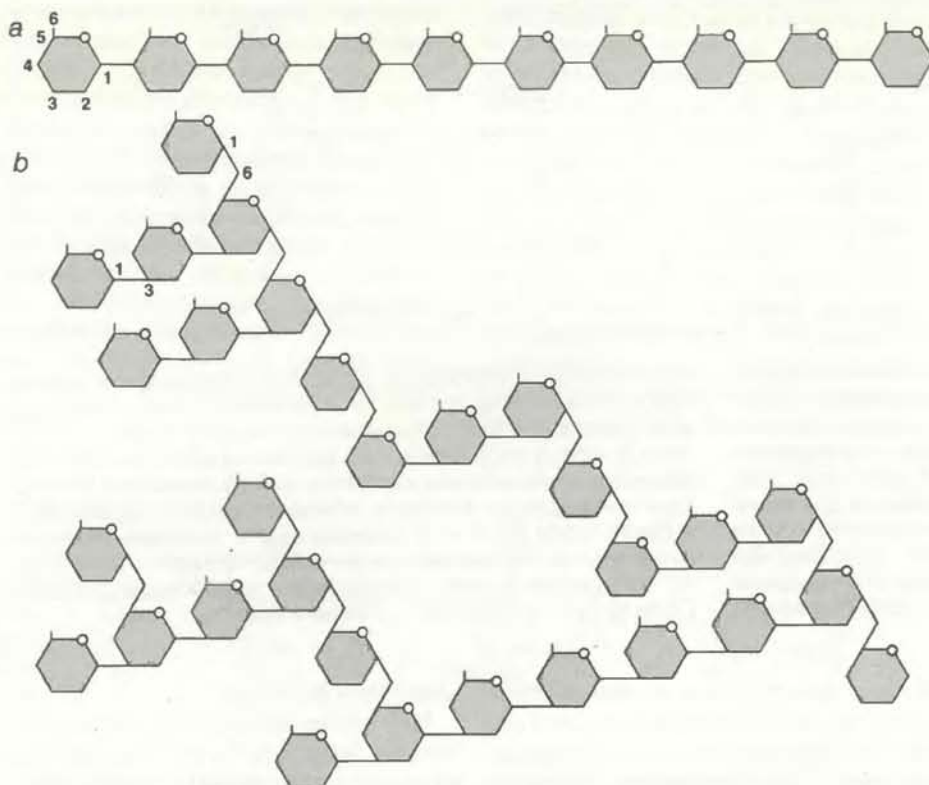
ВОЗМОЖНЫЕ ответы на эти вопросы были получены в результате наших исследований химической основы устойчивости растений к заболеваниям. Растение защищается от патогенных агентов грибковой и бактериальной природы, продуцируя в пораженном участке антибиотики, называемые фитоалексинами. Антибиотики — это не белки, т.е. они не являются непосредственными продуктами экспрессии генов. Чтобы в клетке образовался антибиотик, необходима экспрессия набора генов, которые кодируют ферменты, катализирующие синтез данного антибиотика. Сигнал к экспрессии должен быть подан с помощью какого-то хи-

мического фактора.

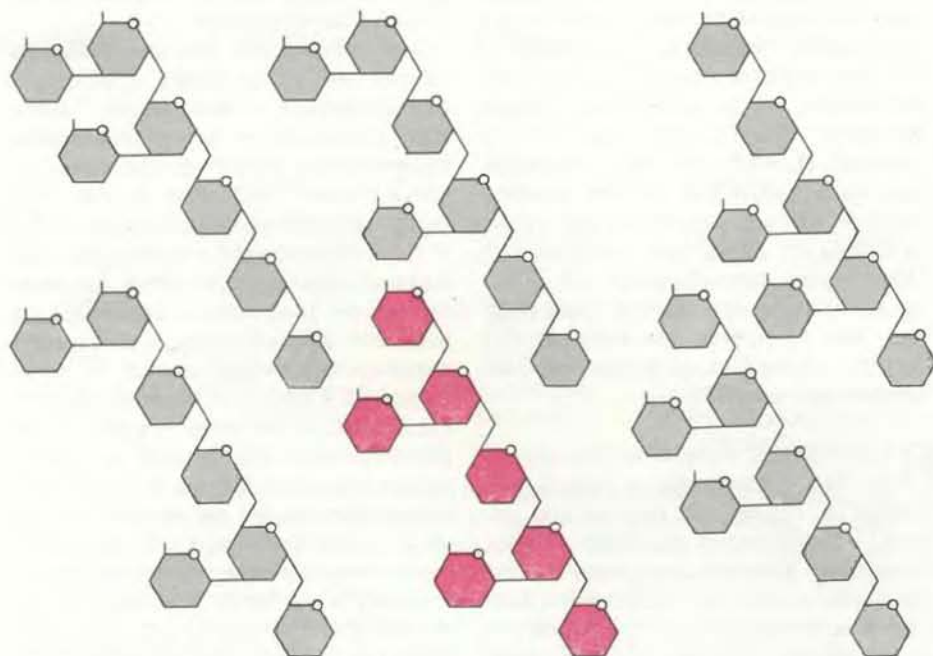
Что это за фактор? Мы задали себе вопрос: может быть, сигналом о том, что надо синтезировать антибиотик, растению служит что-то, входящее в состав самого болезнетворного микроорганизма? Для проверки такой гипотезы нами были выбраны грибки, поражающие сою, поскольку ранее Дж. Фрэнк и Дж. Пакстон из Иллинойского университета в Эрбана-Шампейн разработали метод, позволяющий определять уровень синтеза антибиотиков в ответ именно на эту грибковую инфекцию.

Мы установили, что растение реагирует на присутствие грибкового олигосахарида — фрагмента, который отщепляется от полисахарида, являющегося структурным компонентом стенки грибковой клетки. Это было полной неожиданностью. То, что олигосахариды — короткие углеводные цепочки, которыми мы занимались не один год, — способны переносить информацию, т.е. служить химическими медиаторами, не укладывалось в рамки сложившихся представлений. И тем не менее обработка растительных клеток смесью олигосахаридов, полученных в результате неспецифического кислотного гидролиза стенки грибковых клеток, приводила к синтезу в растительной клетке ферментов, катализирующих синтез антибиотика. Стало ясно, что олигосахариды можно считать регуляторными молекулами.

МЫ ПОСТАВИЛИ перед собой цель определить структуру наименьшего фрагмента клеточной стенки гриба, способного заставить растительную клетку синтезировать антибиотика. Сначала такая задача не казалась слишком трудной, поскольку полисахарид клеточной стенки, кото-



МОЛЕКУЛЫ ГЛЮКОЗЫ могут быть соединены в полисахарид различными способами. Здесь показаны структуры участков двух β -глюканов — полисахаридов, состоящих из молекул глюкозы, соединенных β -гликозидными связями. Когда β -глюкан имеет линейную структуру и все мономеры соединены связью 1 — 4, то это — целлюлоза (вверху). Совершенно иной полисахарид образуется при соединении мономеров связями 1 — 3 и 1 — 6 (внизу). Разветвленная структура и неодинаковые гликозидные связи делают этот β -глюкан гораздо более сложным, чем целлюлоза.



ПЕРВЫЙ ОЛИГОСАХАРИН, идентифицированный авторами с коллегами, был выделен из клеточной стенки гриба, поражающего сою. Он оказался гепта-гликозидом, т.е. цепочкой из 7 остатков глюкозы (цветной), отличающимся от неактивных гептаглюкозидов клеточной стенки только положением, в котором два боковых остатка глюкозы присоединены к остову молекулы — цепочке из пяти молекул глюкозы, связанных β -гликозидными мостиками. Активный гепта-гликозид высвобождается из клеточной стенки гриба под действием фермента, присутствующего в растении-хозяине. Ничтожное количество этого вещества активирует в клетках сои гены, ответственные за синтез антибиотиков, которые могут подавлять рост гриба. Неактивные гептаглюкозиды, в каком бы количестве они ни присутствовали, никакого влияния на эти гены не оказывают и не мешают действию олигосахарина.

рый мы изучали, представлял собой цепочку, состоящую только из молекул глюкозы. Однако впоследствии выяснилось, что эта глюкановая цепочка сложным образом разветвлена, и путь к нашей цели, вопреки ожиданиям, существенно удлинился.

Расщепление этого полисахарида дало смесь большого числа содержащих глюкозу олигосахаридов различного размера. Мы разделили олигосахариды по количеству мономеров глюкозы в каждом из них и установили, что наименьший фрагмент, способный стимулировать синтез антибиотиков в растении, представляет собой гепта- β -гликозид, т.е. олигосахарид, состоящий из семи мономеров — молекул глюкозы, связанных между собой β -гликозидными мостиками. Однако это открытие не решило вопроса полностью, так как среди фрагментов исследованного глюкана было более 300 гепта- β -гликозидов различной структуры! Выделить единственную активную форму из более 300 неактивных оказалось необычайно трудно, так как химически они очень сходны.

Работа по очистке активного олигосахариды была начата нами еще в 1974 г., а первый успех пришел лишь спустя почти 10 лет, когда появилась достаточно совершенная техника химического анализа. В 1983 г. Дж. Шарп, студентка-выпускница, работавшая в нашей лаборатории, выделила один чистый активный гептаглюкозид и пять чистых неактивных его изомеров. Эти соединения она получила в ничтожно малых количествах, но если в 1974 г. мы считали, что для расшифровки их структуры потребуется не менее грамма каждого вещества в чистом виде, то к 1983 г. техника анализа шагнула вперед так далеко, что нам оказалось вполне достаточным иметь всего по 50 микрограммов (50×10^{-6} г) каждого соединения.

Полученные результаты говорили о том, что реакция растения строго специфична: оно узнает олигосахарид совершенно определенной структуры. Активная форма гептаглюкозида, т.е. олигосахарин, и неактивные его формы очень похожи друг на друга. Они различаются только положениями, в которых два боковых остатка глюкозы присоединены к остову молекулы — цепочке из пяти остатков глюкозы, связанных β -гликозидными мостиками. Положения боковых остатков определяют, какой из изомеров гептаглюкозида является активным (см. нижнюю иллюстрацию слева). Присутствия одной миллиардной грамма активной формы гептаглюкозида достаточно для индукции синтеза молекул информационной РНК на матрице ДНК генов, кодирующих соответствующие

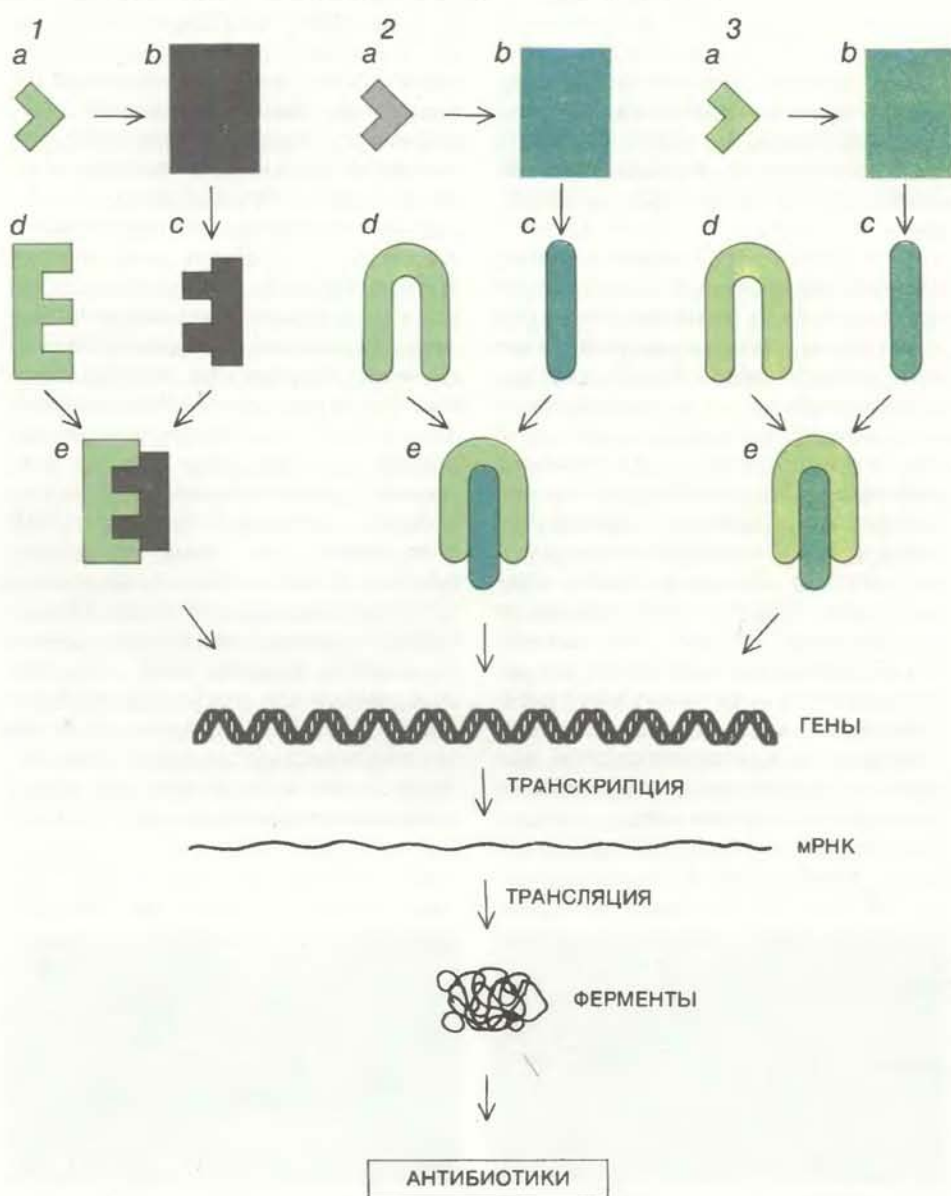
ферменты, а значит, и для начала продуцирования антибиотика. Этот антибиотик останавливает рост гриба, в состав клеточной стенки которого входит данный гептаглюкозид.

НА СЛЕДУЮЩЕМ этапе исследования тот же вопрос, на который мы ответили в случае грибковой инфекции, разумно было поставить применительно к заражению растения бактериями: какой фактор бактериального происхождения обуславливает образование растением антибиотиков в месте проникновения в него бактерий? М. Хан, также студент-выпускник, изучил действие нескольких видов бактерий на сою и получил на этот вопрос удивительный ответ. Он обнаружил, что при бактериальной инфекции сигнал исходит не от патогенного агента, а от стенок самих растительных клеток. Присутствие бактерий каким-то образом приводит к отщеплению олигосахарида от одного из полисахаридов, входящих в состав клеточной стенки. Выделяющийся олигосахарид заставляет соседние клетки растения продуцировать антибиотики. Этим активным веществом оказалась часть пектинового полисахарида клеточной стенки («пектиновый» — значит богатый галактуроновой кислотой), которая, как и глюкоза, относится к простым сахарам и служит мономером в полисахаридах.

Ю. Нотнейджел, работавший в нашей лаборатории по договору после защиты докторской диссертации, установил, что этот активный олигосахарид (т.е. олигосахарин) представляет собой олигогалактуронид: простую линейную цепочку из молекул галактуроновой кислоты.

Ч. Уэст и его сотрудники из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе подтвердили, что олигогалактуронид из клеточной стенки растения может стимулировать образование антибиотиков в растительной клетке, и описали механизм его высвобождения. Оказалось, что грибок, поражающий клеверину, секретирует фермент, который выщепляет из стенки растительной клетки олигогалактуронид, стимулирующий синтез антибиотиков. В нашей лаборатории студент-выпускник К. Дэвис обнаружил аналогичный механизм, когда очищал один из ферментов патогенной для растений бактерии *Erwinia carotovora*. Он установил, что в сое и растениях других изученных им видов этот бактериальный фермент высвобождает из клеточной стенки олигогалактуронид, стимулирующий образование в сое антибиотиков.

Еще один вариант такого процесса был открыт Г. Лайоном, исследователем, работающим у нас по приглашению. Он выяснил, что при повреждении определенных растительных



СИНТЕЗ АНТИБИОТИКОВ в растении инициируется олигосахаридами. Известны три механизма, посредством которых олигосахарины могут высвобождаться из клеточной стенки. При некоторых грибковых инфекциях (1) фермент пораженного растения (a) выщепляет из клеточной стенки грибка (b) гептаглюкозидный фрагмент (c). Грибковый гептаглюкозид является олигосахаридом. В других случаях (2) патогенный агент — грибок или бактерия — выделяет фермент (a), разрушающий клеточные стенки растения (b), из которых при этом высвобождается олигосахарин олигогалактуронид (c). Наконец еще в ряде случаев подвергнутое инфекции растение (3) секретирует фермент (a), выщепляющий олигогалактуронид (b) из собственных клеточных стенок (c). Предполагается, что во всех трех случаях олигосахарин взаимодействует в растении с рецептором (d), образуя активированную сигнальную молекулу (e). Этот сигнал стимулирует транскрипцию определенных генов растения: синтезируются мРНК, которые транслируются с образованием ферментов, катализирующих синтез антибиотиков.

клеток они сами начинают продуцировать фермент, который высвобождает из стенок соседних клеток олигосахарины (предположительно олигогалактурониды), а эти олигосахарины в свою очередь стимулируют в тканях растения синтез антибиотиков. Другими словами, когда бактерии, грибы или вирусы заражают растение и повреждают его клетки, растение способно реагировать на инфекцию, вырабатывая антибиотики, причем для этого вовсе не обязательно присутствие какого-либо специально микробного фермента.

Таким образом, несколько различных механизмов приводят, по видимому, к одинаковому результату: выщеплению из полисахарида клеточной стенки олигосахарида, который является олигосахаридом, стимулирующим продуцирование антибиотиков. В наших экспериментах с грибами-паразитами, как выяснилось, фермент, высвобождающий активный гептаглюкозид из стенки грибковой клетки, принадлежал растению-хозяину. В других случаях такой фермент секретируется самим болезнетворным агентом — грибом

или бактерией, а затем выщеплял из клеточной стенки растения-хозяина олигосахарин — олигогалактуронид. А когда растительная клетка повреждена, она сама секретирует фермент, высвобождающий олигосахарин из стенок других клеток того же растения.

Б. Ходгсон, работавший в нашей лаборатории приглашенным исследователем, и Дэвис показали, что два из этих трех механизмов могут действовать одновременно. Так, когда два олигосахарина — гептаглюкозид, выделяющийся из стенки грибковой клетки под действием растительного фермента, и олигогалактуронид, выщепляемый из клеточной стенки растения ферментом болезнетворного микроба или самого растения, присутствуют вместе, наблюдается их синергический эффект. Это значит, что при совместном действии для активации синтеза антибиотиков требуется гораздо меньше каждого из олигосахаринов, чем потребовалось бы, если бы в пораженном участке находился только один из них.

УСТАНОВИВ, что грибковый гептаглюкозид и растительный олигогалактуронид способны регулировать экспрессию генов растительной клетки, так что стимулируется образование антибиотиков, мы занялись поисками веществ, которые могли бы защищать растения от насекомых-вредителей. К. Райен-младший из Университета шт. Вашингтон и его коллеги открыли, каким образом растения защищаются от протеиназ насекомых (ферментов, переваривающих растительные белки). Оказывается, клетки растения синтезируют ингибиторы протеиназ, причем этот процесс стимулируется химическим агентом, который Райен назвал PIF (сокращение от англ. proteinase-inhibitor factor — фактор, индуцирующий ингибитор протеиназ). Мы сотрудничали с группой Райена с целью определить природу PIF. Выяснилось, что он действительно представляет собой олигосахарин и отщепляется от полисахарида клеточной стенки растения. Затем Райен и его коллеги продемонстрировали, что олигогалактуронид, стимулирующий синтез ингибитора протеиназ, сходен с тем, который, как показали прежние работы, стимулирует образование в растении антибиотиков. Создается впечатление, что олигогалактурониды могут вызывать различные последствия в зависимости от того, на какие растительные клетки они действуют, и таким образом обеспечивать специфику защитной реакции, ее адекватность ситуации.

Особенно важным аспектом защитной реакции растения является «самопожертвование» тех нескольких клеток, которые первыми вступают в контакт с болезнетворным микробом. Такая «сверхчувствительная защитная реакция» наблюдается очень часто. Считается, что этим растение каким-то образом задерживает развитие микробной инфекции на время, достаточное для того, чтобы начали действовать прочие защитные механизмы (в частности, чтобы накопились антибиотики).

Мы предположили, что патогенный организм вызывает рядом с инфицированным участком высвобождение из клеточных стенок олигосахарина, который воспринимается пораженными растительными клетками как сигнал к гибели. Наша гипотеза подтвердилась: мы вместе с приглашенным исследователем Н. Ямадзакки выделили из клеточных стенок платана олигосахарин, под действием которого клетки этого растения гибнут. Студент-выпускник С. Доарес обнаружил, что олигосахарины платана могут убивать не только клетки платана, но и клетки кукурузы, причем олигосахарины из клеточных стенок кукурузы в свою очередь убивают как клетки кукурузы, так и клетки платана. Эти и некоторые другие данные указывают на то, что «самоубийство» клеток вполне может вызываться распознаванием ими олигосахаринов, выделяемых стенками соседних клеток в ответ на проникновение микроба. Олигосахарин, вызывающий гибель клеток, представляет собой не олигогалактуронид, а какой-то другой фрагмент клеточной стенки, имеющий более специфичные функции.

Мы предположили, что патогенный организм вызывает рядом с инфицированным участком высвобождение из клеточных стенок олигосахарина, который воспринимается пораженными растительными клетками как сигнал к гибели. Наша гипотеза подтвердилась: мы вместе с приглашенным исследователем Н. Ямадзакки выделили из клеточных стенок платана олигосахарин, под действием которого клетки этого растения гибнут. Студент-выпускник С. Доарес обнаружил, что олигосахарины платана могут убивать не только клетки платана, но и клетки кукурузы, причем олигосахарины из клеточных стенок кукурузы в свою очередь убивают как клетки кукурузы, так и клетки платана. Эти и некоторые другие данные указывают на то, что «самоубийство» клеток вполне может вызываться распознаванием ими олигосахаринов, выделяемых стенками соседних клеток в ответ на проникновение микроба. Олигосахарин, вызывающий гибель клеток, представляет собой не олигогалактуронид, а какой-то другой фрагмент клеточной стенки, имеющий более специфичные функции.



ДЕЙСТВИЕ ОЛИГОСАХАРИНОВ НА МОРФОГЕНЕЗ растений. Из цветоножки табака вырезали полоски шириной 1—2 мм и длиной 10 мм (вверху слева), в которые входили эпидермис (один слой клеток), субэпидермис (один слой клеток) и паренхима (1—3 клеточных слоя). Примерно 20 таких эксплантатов помещали в чашку Петри с жидкой культуральной средой, содержащей глюкозу (в качестве источника энергии) и минеральные соли, и добавляли гормоны — ауксин и цитокинин, а также определенные смеси олигосахаринов. От соотношения количеств ауксина и цитокинина, от pH среды и от состава смеси олигосахаринов зависит, по какому пути пойдет развитие эксплантата. На фото представлены растущие на твердом агаре эксплантаты, из которых под влиянием различных олигосахаринов развились недифференцированный каллус (вверху справа), корни (внизу слева), вегетативные побеги и листья (внизу в середине), цветочные побеги (внизу справа).

ОБНАРУЖИВ олигосахарины, способные стимулировать защитную реакцию растения, мы решили выяснить, не участвуют ли подобные молекулы в регуляции других функций, например роста, развития и размножения. Не действуют ли (по крайней мере в некоторых случаях) такие классические регуляторы роста растений, как ауксин и гиббереллин, косвенным путем — активируя особые ферменты, высвобождающие олигосахари-

ны, которые уже непосредственно влияют на ряд нормальных физиологических процессов в растении?

На протяжении многих лет изучалось стимулирующее действие ауксина (и синтетических ауксинов, в частности 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты) на рост кусочков стебля семян гороха. Совместно с У. Йорком мы исследовали способность олигосахаридов из клеточной стенки платана модулировать влияние ауксина на скорость роста и установили, что смеси олигосахаридов, полученные из полисахаридов клеточной стенки платана, могут подавлять стимулированный ауксином рост фрагментов горохового стебля, помещенных в чашки для культивирования. Потребовалось около трех лет, чтобы выделить и получить в высокоочищенном виде активную олигосахаридную фракцию из ксиллоглюкана — полисахарида, присутствующего в первичной стенке растительных клеток. Эта фракция резко подавляет вызванный ауксином рост кусочков горохового стебля. Мы полагаем, что данный олигосахарин представляет собой нонасахарид (молекулу из девяти мономеров) или же очень близкую к нему структуру. Концентрация этого вещества, необходимая для подавления стимулированного ауксином роста, примерно в 100 раз ниже концентрации ауксина, при которой стимуляция наблюдается.

Описанная работа имеет самое тесное отношение к открытиям, о которых примерно 10 лет назад сообщили Г. Маклачлан и его коллеги из Университета Мак-Гилла. Они показали, что обработка стеблей гороха ауксином не только стимулирует рост, но и примерно в 50 раз повышает активность особого фермента в стенке клеток стебля. Впоследствии эти исследователи установили, что обнаруженный ими фермент расщепляет ксиллоглюкан на олигосахариды, среди которых преобладают нона- и гептасахаридные фрагменты. А в нашей теперешней работе выяснилось, что какой-то нонасахаридный фрагмент ксиллоглюкана (или очень близкий к нему олигосахарид), высвобождающийся в результате ферментативного расщепления последнего, подавляет стимулированный ауксином рост. Другими словами, ауксин, в целом стимулируя рост стеблей гороха, помимо этого, активирует фермент высвобождающий из клеточной стенки олигосахарин, действие которого выражается в подавлении роста. Такие действующие по принципу обратной связи модуляторы гормональной активности хорошо известны у животных, однако у растений они обнаружены впервые.

Мы считаем, что ауксин повышает активность фермента, расщепляюще-

го полисахарид, путем увеличения его количества, т.е. активирует кодирующие его гены. Вероятно, когда в результате олигосахарина, подавляющего стимулированный ауксином рост, становится много, он может переноситься вниз по стеблю растения и угнетать рост пазушных почек. Хорошо известно, что, если срезать апикальную почку с верхушки стебля, растение делается более кустистым. Это объясняли тем, что вместе с верхушечной почкой ликвидируется источник ауксина, который, как считалось, непосредственно ответствен за преобладание верхушечного роста и подавление бокового. Однако, по нашему мнению, удаление источника ауксина на самом деле приводит к уменьшению количества фермента, высвобождающего из ксиллоглюкана олигосахарин, действующий как ингибитор роста. Если мы правы, этот олигосахарин (который, как было показано, подавляет рост кусочков стебля) и является прямым ингибитором развития боковых почек. В настоящее время ведутся эксперименты, цель которых — проверить, действительно ли данное вещество, угнетая боковой рост, заставляет растение становиться высоким и стройным, являясь, таким образом, регулятором одной из важнейших характеристик формы растения.

УЧАСТВУЮТ ли олигосахарины помимо защитных реакций и регуляции роста и формы растения в регуляции морфогенеза (развития органов) и размножения? С целью определить их роль в этих процессах мы решили проверить, способны ли они заставить ткань, растущую в культуральной среде, сформировать органы. Къем Тран Тхань Ван и ее коллеги из фитотронной лаборатории в Жиф-сюр-Иветт (Франция) разработали изящную методику культуры ткани для изучения действия внешних факторов на рост. Они вырезали из цветоножки табака тонкие полоски ткани и помещали такие «эксплантаты» в жидкую культуральную среду, содержащую глюкозу (в качестве источника энергии) и соли. Сюда же затем добавляли точно отмеренные количества ауксина и цитокинина и создавали определенный рН (показатель концентрации ионов водорода). В серии экспериментов было установлено, что от соотношения ауксина и цитокинина и от рН среды зависит, вырастет ли из эксплантата каллус, т.е. недифференцированная масса клеток, либо произойдет дифференцировка и образуются цветки, вегетативные почки или корни.

Наша гипотеза состояла в том, что ауксин, цитокинин и рН среды влияют на высвобождение и изменение на-

бора химических медиаторов, каждый из которых регулирует биохимические реакции, необходимые для осуществления той или иной программы развития. Къем Тран Тхань Ван, П. Тубар и А. Куссон из Жиф-сюр-Иветт в сотрудничестве с Д. Голлингом, П. Челф и нами провели экспериментальную проверку этого предположения. К культуральной среде, в которой находился эксплантат табака, добавляли смеси олигосахаридов, выделенных из клеток платана, чтобы выяснить, есть ли среди них олигосахарины, способные влиять на органогенез. Было взято несколько различных смесей олигосахаридов. Одна из них, как было показано нами ранее, подавляла цветение и стимулировала рост вегетативных (т.е. не связанных с размножением) органов у яски. Оказалось, что она также подавляет формирование цветков и одновременно стимулирует обильное образование вегетативных почек у эксплантатов табака. Необходимое для этого количество олигосахаридов было крайне малым: в 100—1000 раз меньше, чем содержание в среде ауксина и цитокинина. В присутствии другой смеси эксплантаты, которые без добавления олигосахаридов формировали вегетативные почки, начинали образовывать цветки. Еще одна смесь олигосахаридов заставляла эксплантаты давать большое количество корней вместо вегетативных почек или каллуса, которые возникли бы в иных условиях.

СПОСОБНОСТЬ олигосахаридов влиять на развитие органов из эксплантатов табака является убедительным доказательством того, что эти фрагменты клеточной стенки служат регуляторами морфогенеза и размножения растений. Опираясь на результаты описанных выше экспериментов и наши данные о сложном строении полисахаридов клеточной стенки, мы предложили следующую теорию. У растений стенки клеток представляют собой хранилище множества специфических олигосахаридов. Эти вещества — один из уровней в иерархии гормональной системы. Они не только отвечают за активацию защитных механизмов, но и влияют на рост растения, его морфогенез и размножение. Когда-нибудь станет возможным получать в большом количестве нужные олигосахариды и, опрыскивая ими растения, заставлять их цвести или давать семена и плоды, образовывать клубни или приобретать устойчивость к различным болезням или насекомым-вредителям, сбрасывать плоды, расти быстрее, пышнее, выше. . . Олигосахариды должны занять важное место в сельском хозяйстве будущего.

Как устроен аппарат Гольджи

Эта клеточная органелла модифицирует белки, сортирует их и упаковывает для отправки по нужному адресу.

Как показали исследования, аппарат Гольджи состоит из трех отделов, или компартментов, каждый из которых специализирован для определенного типа модификации белков

ДЖЕЙМС Э. РОТМАН

КЛЕТКА — это фундаментальная структурная единица живого организма, но это не означает, конечно, что клетка неделима. Напротив, в любой клетке не менее десятка различных компартментов — органелл, каждая из которых предназначена для выполнения своего набора функций. Так, в клеточном ядре хранится генетическая информация, в секреторных гранулах запасаются вещества, которые впоследствии выделяются из клетки, а наружная, или плазматическая, мембрана контролирует поступление веществ внутрь клетки и выход из нее. Органелла выполняет свою функцию посредством серии сопряженных химических реакций, каждая из которых катализируется специальным белком-ферментом. Органелльная организация, или, как еще говорят, компартментализация клетки, играет жизненно важную роль в ее функционировании, поскольку иначе тысячи клеточных ферментов были бы перемешаны и упорядоченная биохимическая активность была бы невозможна.

Чтобы избежать хаоса биохимических процессов, каждый из великого множества новообразованных белков должен быть определенным образом модифицирован, отсортирован и с большой точностью доставлен в соответствующий компартмент. За истекшие двадцать лет стало ясно, что в основном перемещения макромолекул в клетке так или иначе связаны с аппаратом Гольджи. Эта органелла, обнаруженная во всех эукариотических (т.е. содержащих ядро) клетках, состоит из крошечных, образованных мембранами замкнутых мешочков; мешочки уплощенные и «уложены» в стопку наподобие стопки обеденных тарелок. К одному концу такой стопки поступают новообразованные белки. Большинство их содержат олигосахариды (длинные цепи из молекул простых сахаров) и называются поэтому гликопротеинами. Проходя через стопку Гольджи, белок подвергается

специфической химической модификации, характер которой часто определяется его предназначением. На другом конце стопки белки сортируются согласно своему предназначению и отправляются по нужному адресу.

До последнего времени мало что было известно о том, как аппарат Гольджи функционирует, как его устройство связано с осуществлением столь сложных операций модификации и сортировки белков. Исследования, которые велись в нашей и других лабораториях начиная с 1980 г., показали, что стопки Гольджи обладают прецизионной внутренней структурой. В каждой стопке можно выделить по крайней мере три отдела, или компартмента, состоящих из одного или более мешочков. Каждый компартмент содержит определенный набор ферментов, необходимых для осуществления того или иного этапа модификации белка, и подобен, следовательно, отдельному узлу конвейера. Для правильной модификации белок должен последовательно пройти через все узлы — через все компартменты аппарата Гольджи. Теперь, когда прояснилась взаимосвязь между структурой и функцией аппарата Гольджи, интересы исследователей смещаются в сторону иных вопросов. Как белки проходят через

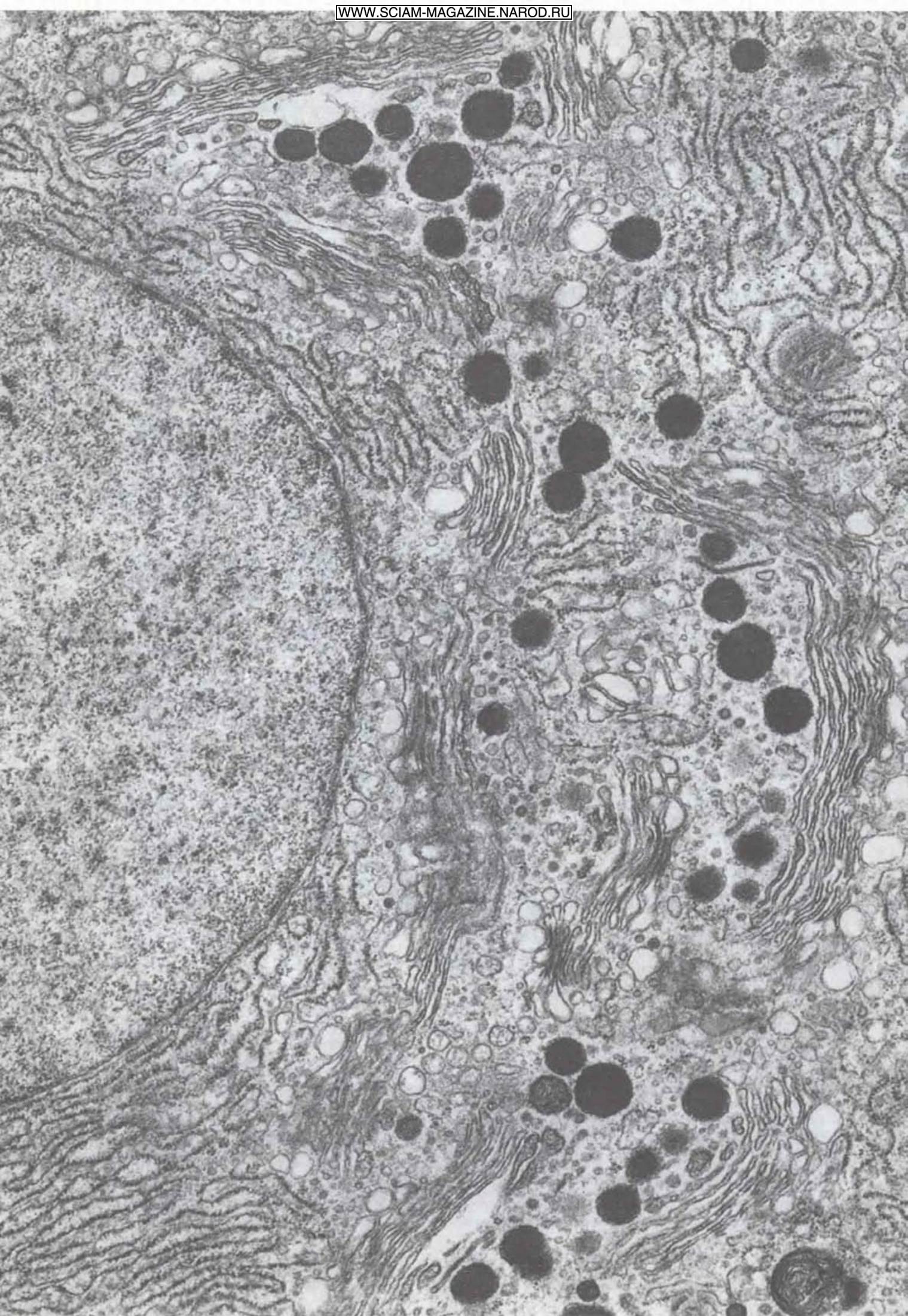
стопку Гольджи? Как они сортируются в соответствии со своим предназначением? Как они, наконец, упаковываются для доставки по нужному адресу?

Стопка Гольджи

Отдельный образованный мембраной замкнутый мешочек в стопке Гольджи носит название цистерны. Среднее количество цистерн в стопках Гольджи варьирует в широких пределах. В типичных клетках млекопитающих в стопке, как правило, 5—6 цистерн, а в клетках растений и низших организмов число их может быть 20 и более. Диаметр цистерны обычно около микрометра. Мембраны цистерн, как и другие клеточные мембраны, представляют собой липидный «бислой», образованный двумя слоями противоположно ориентированных молекул липидов. Между плотно упакованными молекулами липидов встроены молекулы разных белков. До сих пор не выяснен механизм, обеспечивающий уплощенную форму цистерн и удерживающий их в тесной близости друг к другу. Во всяком случае, пока клетка не начинает делиться, цистерны сохраняют характерное стопочное расположение.

Стопка Гольджи не симметрична. На одном конце стопки цистерны

СТОПКИ ГОЛЬДЖИ в цитоплазме клетки дуоденальной бруннеровой железы, активно секретирующей белки. Крупное округлое образование в левой части снимка — это ядро. Структуры неправильной формы, усыпанные черными крапинками, вокруг ядра и в других областях цитоплазмы, — эндоплазматический ретикулум (крапинки — рибосомы). Предназначенные для секреции белки синтезируются на рибосомах эндоплазматического ретикулума и затем транспортируются к рассеянному по всей цитоплазме стопкам Гольджи — они имеют вид групп волнистых параллельных линий. Каждая волнистая линия представляет собой поперечный срез уплощенного образованного мембраной мешочка, называемого цистерной. В стопках Гольджи белки химически модифицируются и сортируются. Возле каждой цистерны видны мелкие пузырьки — это транспортные везикулы, переносящие белки от одной цистерны к другой. Белки упаковываются затем в секреторные запасующие гранулы, которые на фотографии выглядят как черные кружки, так как связали специфический краситель. Электронная микрофотография получена Д. Френдом из Медицинского центра Калифорнийского университета в Сан-Франциско.

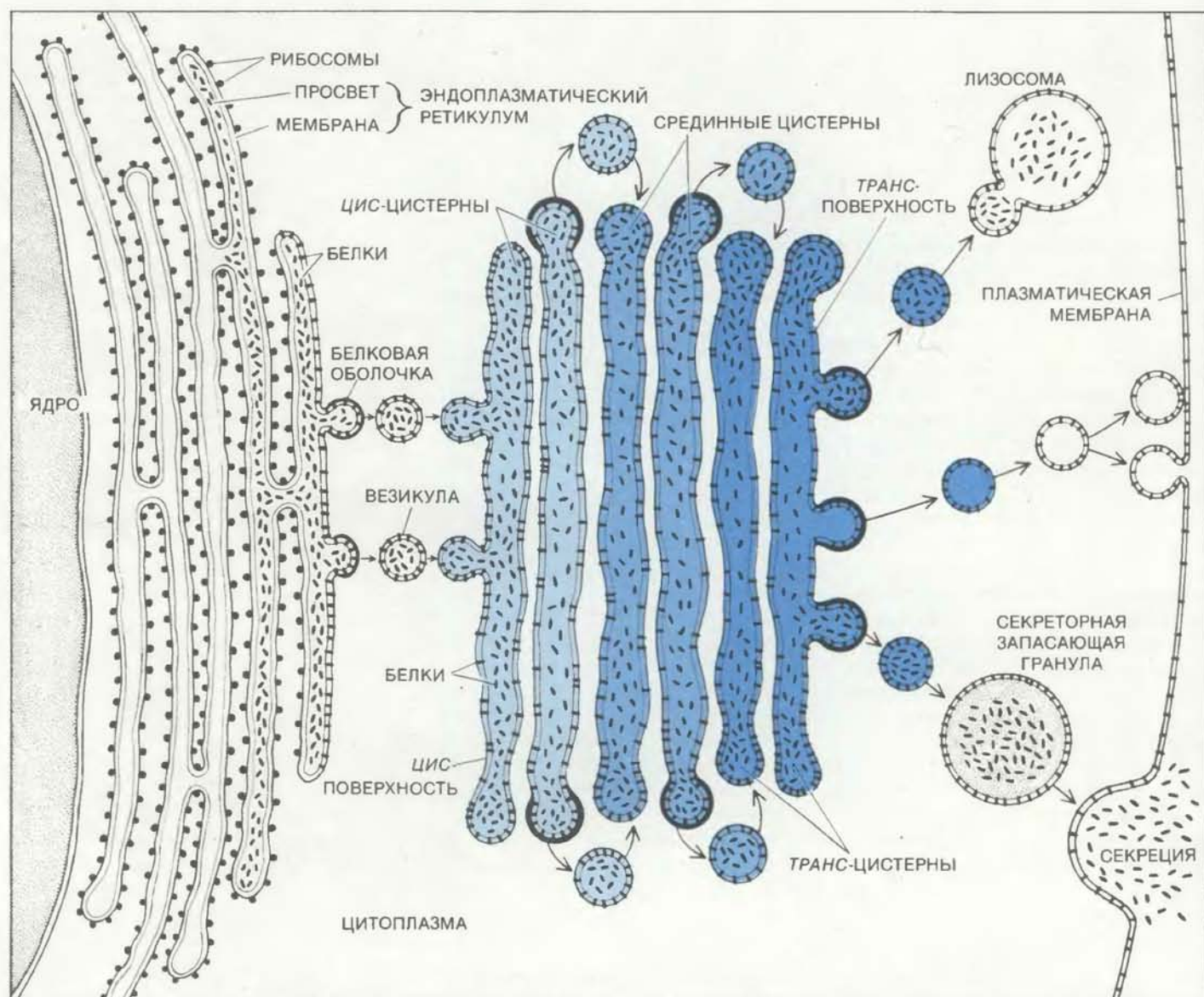


специализированы для приема новообразованных гликопротеинов. Этот конец стопки называют *цис*-стороной, а поверхность цистерн — *цис*-поверхностью. Гликопротеины, поступающие к *цис*-стороне стопки Гольджи, синтезируются на рибосомах, расположенных на внешней поверхности эндоплазматического ретикулума. Эндоплазматический ретикулум образован протяженными непрерывными мембранами сложной формы. По мере сборки полипептидной цепи белок либо проникает в просвет (внутреннее пространство) эндоплазматического ретикулума, либо

встраивается в его мембрану — в зависимости от характера белка. Новообразованные белки заключаются затем в везикулы (пузырьки), формируемые из участков мембраны эндоплазматического ретикулума. Когда такой пузырек достигает *цис*-стороны стопки Гольджи, его мембрана сливается с мембраной цистерны, а содержимое изливается внутрь нее. Таким образом, на *цис*-стороне стопки Гольджи появляется исходная точка перемещения гликопротеинов к противоположному, или *транс*-концу, стопки.

Современные представления о со-

бытиях, происходящих с гликопротеинами по мере их перемещения от *цис*-к *транс*-стороне стопки Гольджи, базируются на результатах серии исследований, начатых еще в конце XIX столетия. Очень скоро после того, как в 1898 г. итальянский гистолог Камилло Гольджи открыл органеллы, названные в честь него аппаратом, или комплексом, Гольджи, возникло предположение об участии этих органелл в транспорте секреторных белков из клеток наружу. В 1960 г. Дж. Палладе и его коллеги из Рокфеллеровского института медицинских исследований установили, что



ТРИ КОМПАРТМЕНТА стопки Гольджи. Каждый из них содержит свой набор ферментов. Белки синтезируются на рибосомах, прикрепленных к мембране эндоплазматического ретикулума. Новообразованные белки либо встраиваются в эту мембрану, либо проникают во внутреннее пространство (просвет) эндоплазматического ретикулума. Затем они заключаются в везикулы, формирующиеся из участков мембраны ретикулума. Везикулы покрыты белковой оболочкой, необходимой для их отпочковывания от мембраны; после отпочковывания она сбрасывается. Везикулы перемещаются к стопке Гольджи и на одном ее кон-

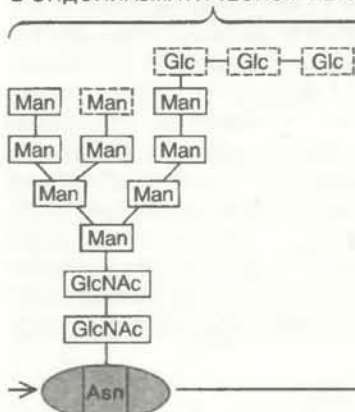
це сливаются со специализированной цистерной, образующей *цис*-компаратмент. Из нее белки переносятся с помощью других везикул в цистерны срединного компартмента и, наконец, попадают в *транс*-компаратмент. По мере продвижения через стопку каждый белок модифицируется в соответствии с его предназначением. В *транс*-компаратменте белки сортируются и упаковываются для отправки по нужному адресу. Одни белки направляются в секреторные запасные гранулы, другие — в лизосомы (крупные органеллы, содержащие гидролитические ферменты), а третьи — в плазматическую мембрану клетки.

секретируемые белки проходят через аппарат Гольджи. Применив комбинацию радиоавтографического анализа, цитохимии и электронной микроскопии, Палладе проследил путь белков в клетках поджелудочной железы от рибосом через аппарат Гольджи в специальные везикулы — секреторные запасные гранулы, в составе которых эти белки покидают клетки. Ч. Леблон и его коллеги из Университета Мак-Гилла обнаружили, что прохождение секретированных белков через стопку Гольджи обычно сопровождается присоединением к ним молекул сахаров. Эти результаты имели принципиальное значение, поскольку впервые было показано, что в аппарате Гольджи происходит весьма существенный процессинг (созревание) белков.

В 1970—1980 гг. были получены данные, создавшие более полное и стройное представление о функциях аппарата Гольджи. Поворотным событием явилось выделение в 1970 г. высокоочищенных препаратов аппарата Гольджи, осуществленное С. Флейшером из Университета Вандербильта, С. Роземаном из Университета Джонса Гопкинса и Палладе. Это дало возможность проанализировать биохимические компоненты стопок Гольджи и выявить различные ферменты в их мембранах. Последующие эксперименты показали, что стопки содержат наборы различных ферментов, обеспечивающих разнообразие химические модификации. Ферменты не только присоединяют или отщепляют молекулы сахаров, но также присоединяют к белковым молекулам фосфатные и сульфатные группы и даже жирные кислоты. Зачем нужны эти модификации, в точности пока не известно, но они дали биохимикам прекрасный инструмент для изучения организации аппарата Гольджи.

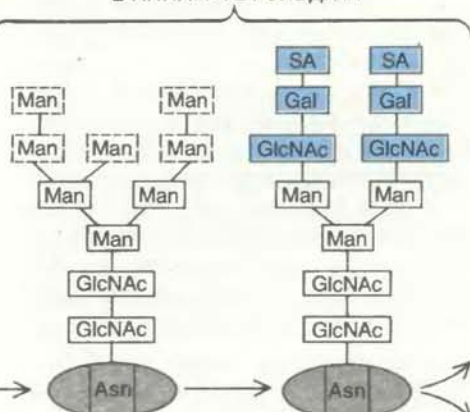
Было обнаружено, что те сахара, которые присоединяются к белкам в аппарате Гольджи, встречаются помимо секреторных гранул также в других компартментах клетки, в том числе в лизосомах (крупных везикулах, содержащих гидролитические ферменты, расщепляющие ненужные клетке макромолекулы) и в плазматической мембране. Стало ясно, что не только секретированные, но и другие белки проходят через аппарат Гольджи: белки, предназначенные для многих компартментов в цитоплазме, проходят через стопку Гольджи, прежде чем направляются в надлежащие участки клетки. Следовательно, аппарат Гольджи не только модифицирует проходящие через него белки, но и сортирует их на группы в соответствии с их назначением.

В ЭНДОПЛАЗМАТИЧЕСКОМ РЕТИКУЛУМЕ

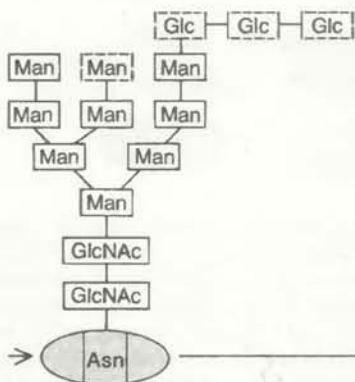


БЕЛОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ СЕКРЕТОРНЫХ ГРАНУЛ
ИЛИ ПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЫ

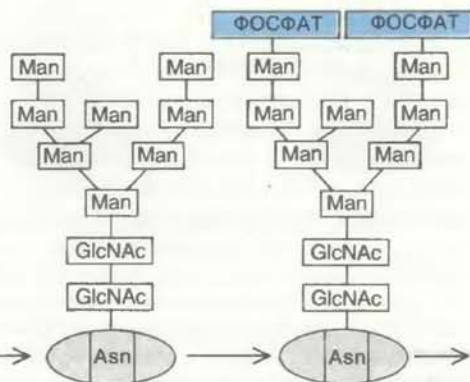
В АППАРАТЕ ГОЛЬДЖИ



К ПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ
МЕМБРАНЕ
ИЛИ СЕКРЕТОРНЫМ
ГРАНУЛАМ



БЕЛОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ ЛИЗОСОМ



К ЛИЗОСОМАМ

- Man МАННОЗА
- Glc ГЛЮКОЗА
- GlcNAc N-АЦЕТИЛ-
ГЛЮКОЗАМИН
- Asn АСПАРАГИН
- SA СИАЛОВАЯ
КИСЛОТА
- Gal ГАЛАКТОЗА

ОЛИГОСАХАРИДНЫЕ ЦЕПИ присоединяются почти ко всем белкам, направляющимся в аппарат Гольджи, еще когда они находятся в эндоплазматическом ретикулуме. Олигосахаридная цепь (слева вверху) состоит из 14 мономеров — остатков сахаров, являющихся гексозами или их производными. В эндоплазматическом ретикулуме ко всем белкам присоединяются одинаковые олигосахаридные цепи, причем связь образуется всегда через аминокислоту аспарагин. Белок, содержащий олигосахарид, называется гликопротеином. Ферменты эндоплазматического ретикулума удаляют из олигосахаридной цепи все остатки глюкозы и один остаток маннозы. Судьба гликопротеина, поступившего в стопку Гольджи, зависит от его назначения в клетке. Секреторные белки и белки плазматической мембраны быстро теряют почти все маннозные остатки и присоединяют молекулы сиаловой кислоты, галактозы и N-ацетилглюкозамина (справа вверху). Лизосомальные белки присоединяют фосфатную группу и более не модифицируются (справа внизу).

Путь гликозилирования

Как же устроены стопки Гольджи, как они осуществляют процессинг и сортировку белков? Первые указания на то, что цистерны представляют собой компартменты, специализированные для различных этапов процессинга белков, появились в 1950—1960 гг., задолго до того, как стал понятен химизм аппарата Гольджи. Цитологи, использовавшие для выявления аппарата Гольджи гистохимиче-

ские красители и осаждающие вещества, показали, что некоторые соединения окрашивали одни цистерны в стопке Гольджи, но не окрашивали другие. Такое дифференциальное окрашивание не могло, однако, дать точное представление о функциональной организации стопок, потому что в большинстве случаев биохимический смысл окрашивания был неясен (и остается неясным до сего времени). Более того, не была еще установлена последовательность процессинга бел-

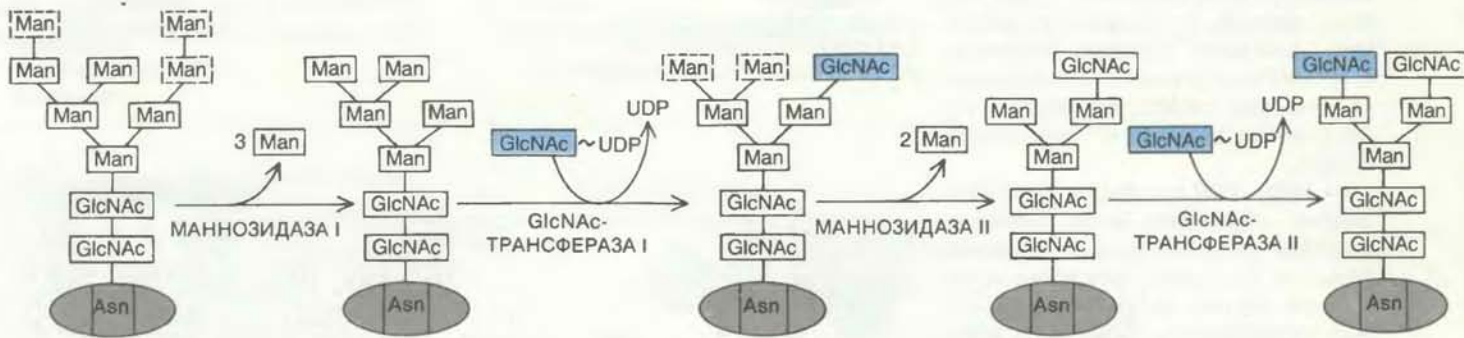
ков в цистернах, поскольку не удалось связать цветные реакции с этапами процессинга.

В конце 70-х годов удалось почти полностью расшифровать последовательность этапов формирования олигосахаридных цепей гликопротеинов в стопках Гольджи, что было очень важным достижением. В этой работе участвовали исследователи из нескольких лабораторий. Наибольший вклад внесли С. Корнфельд и его со-

трудники из Медицинской школы Вашингтонского университета. Их результаты были дополнены Г. Шахтером из Торонтского университета, Р. Хиллом из Медицинского центра Университета Дьюка, Ф. Роббинсом из Массачусетского технологического института и К. фон Фигурой из Мюнхенского университета. Вначале были открыты гликозилтрансферазы (ферменты, катализирующие присоединение новых сахарных остатков к расту-

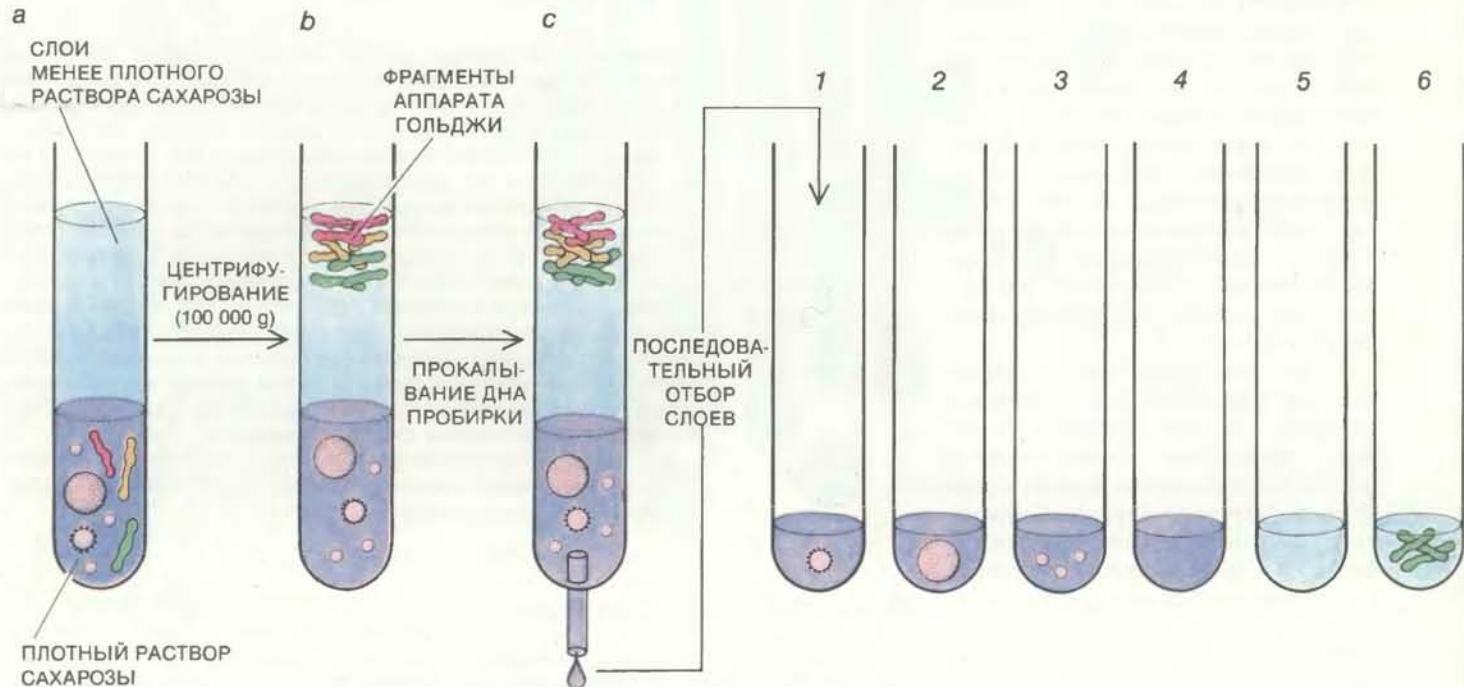
щей олигосахаридной цепи) и выяснен порядок их действия. Затем обнаружались и другие ферменты, катализирующие непредвиденные промежуточные этапы, на которых определенные молекулы сахаров удаляются из олигосахаридной цепи.

Процессинг начинается в просвете эндоплазматического ретикулума, где ко всем образующимся гликопротеинам присоединяются одинаковые олигосахаридные цепи. Каждая такая



ПУТЬ ГЛИКОЗИЛИРОВАНИЯ в стопках Гольджи — это последовательность ферментативных реакций, в ходе которых олигосахаридная цепь гликопротеина модифицируется. Здесь изображена схема модификации типичных секреторных белков и белков плазматической мембраны. На первом этапе фермент, называемый маннозидазой I, отщепляет от олигосахаридной цепи три остатка маннозы. Сразу после этого другой фермент, N-ацетилглюкозамин-

трансфераза I, присоединяет к ней один остаток N-ацетилглюкозамина. Эта реакция требует затраты энергии, поэтому с ней сопряжено расщепление макроэргической связи, образовавшейся ранее между присоединяемым сахаром и фосфатной группой, входящей в состав вспомогательной молекулы. Вспомогательными молекулами служат нуклеотиды — либо уридиндифосфат (UDP), либо цитидинмонофосфат (CMP). После присоединения первого



ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ В ГРАДИЕНТЕ ПЛОТНОСТИ дало первые указания на то, что ферменты гликозилирования локализованы группами в определенных участках стопки Гольджи. Клетки разрушали, и их содержимое помещали в концентрированном растворе сахарозы на дно центрифужной пробирки (а). Затем сверху последовательно наносили слои растворов сахарозы со все меньшей плотностью. Пробирку центрифугировали при 100 000 g (b). В процессе центрифугирования каждая клеточная органелла,

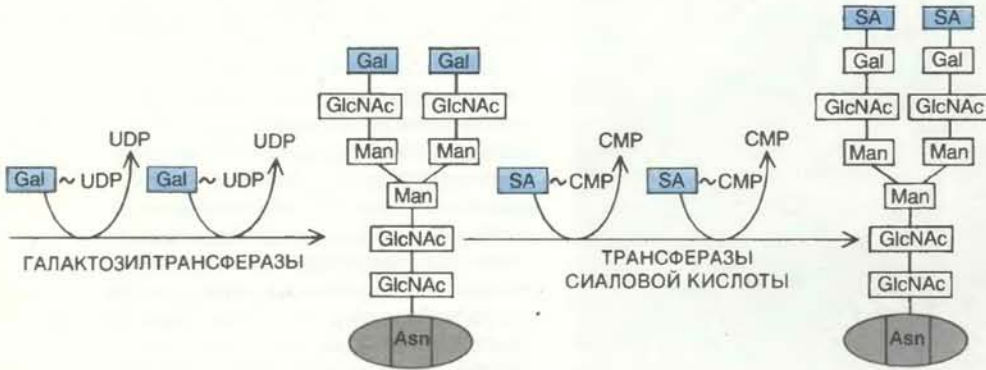
включая фрагменты цистерн Гольджи, смешалась в тот слой, плотность которого равнялась плотности самой органеллы. Содержимое центрифужной пробирки по каплям переносили в серию пробирок, так что в одной пробирке оказывались частицы с одинаковой плотностью (с). Фрагменты цистерн Гольджи распределялись при этом по трем пробиркам, что указывало на существование в аппарате Гольджи мембран трех типов, различающихся по плотности. Как показал химический анализ, для каждого типа

цепь состоит из 14 молекул простых сахаров: двух молекул N-ацетилглюкозамина (GlcNAc), девяти молекул маннозы и трех молекул глюкозы. Эти сахара, равно как и сахара, присоединяемые впоследствии к олигосахариду в стопках Гольджи, представляют собой либо гексозы (т.е. углеводы, содержащие 6 атомов углерода), либо их производные. Еще когда гликопротеин находится в эндоплазматическом ретикулуме, от него очень

быстро отщепляются все три остатка глюкозы и один остаток маннозы; после этого гликопротеины переносятся в составе везикул к аппарату Гольджи.

В результате процессинга в эндоплазматическом ретикулуме все разнообразные гликопротеины, прибывающие к *цис*-поверхности стопок Гольджи, несут одинаковые олигосахаридные цепи. Однако внутри стопок процессинг разных белков проис-

ходит уже совершенно различным образом. Так, например, белки, предназначенные для лизосом, в стопках каким-то образом распознаются и к олигосахаридной цепи каждого из них присоединяется фосфатная группа; в дальнейшем сколько-нибудь существенных модификаций с ними не происходит. А секреторные белки и белки плазматической мембраны, как правило, подвергаются значительно более глубокой модификации, в ходе которой они теряют почти все остатки маннозы. Удаление маннозы происходит в два этапа. На первом этапе фермент, называемый маннозидазой I, удаляет три маннозных остатка, и немедленно вслед за этим фермент GlcNAc-трансфераза I присоединяет одну молекулу GlcNAc к одной из оставшихся молекул маннозы. На втором этапе маннозидаза II отщепляет еще два остатка маннозы, после чего GlcNAc-трансфераза II присоединяет вторую молекулу GlcNAc. После удаления маннозы и присоединения GlcNAc другие ферменты присоединяют к олигосахаридной цепи галактозу и сиаловую кислоту.

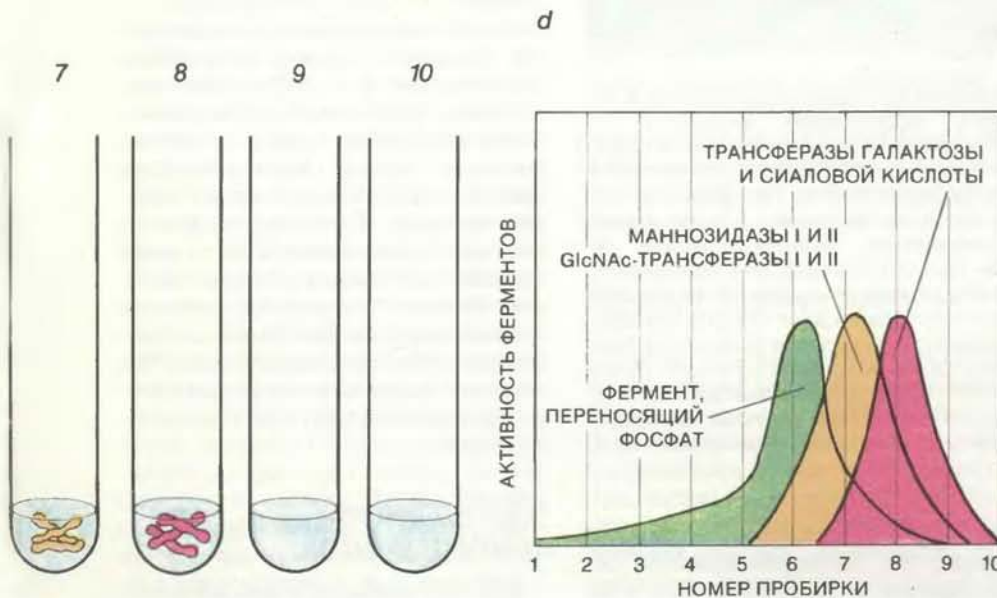


остатка N-ацетилглюкозамина маннозидаза II отщепляет еще два маннозных остатка, а N-ацетилглюкозаминтрансфераза II присоединяет второй остаток N-ацетилглюкозамина. Наконец, осуществляется присоединение галактозы и сиаловой кислоты (SA) специфичными к этим сахарам ферментам. Последовательность ферментативных реакций процессинга гликопротеинов в аппарате Гольджи установлена, и теперь в центре внимания локализация индивидуальных ферментов внутри стопки.

Три компартмента

Новое понимание роли гликозилирования легло в основу создания молекулярных инструментов для исследования внутренней организации аппарата Гольджи. В 1981 г. мною совместно с У. Данфи и Э. Фрайсом (которые были тогда соответственно дипломником и окончившим аспирантуру сотрудником нашей лаборатории) было установлено, что маннозидаза I и ферменты, присоединяющие галактозу и сиаловую кислоту к олигосахаридным цепям белков, локализованы в разных участках аппарата Гольджи. В экспериментах, которые привели нас к этому выводу, использовалось то, что плотность разных компартментов аппарата Гольджи неодинакова. Вкратце эксперименты состояли в следующем. На дно центрифужной пробирки наносили слой концентрированного раствора сахарозы, имеющего большую плотность. Клетки разрушали, так что из них высвобождались органеллы, полученный материал помещали в пробирку, после чего сверху наносили слой раствора сахарозы со все меньшей плотностью. При центрифугировании таких препаратов клеточные органеллы флотировали, пока не достигали слоя сахарозы с плотностью, равной своей собственной.

При разрушении клеток перед центрифугированием цистерны Гольджи (или их фрагменты), как правило, разъединялись. Если остатки цистерн



мембран характерен свой набор ферментов для процессинга гликопротеинов (d). Фракция наиболее плотной мембран содержала ферменты, катализирующие присоединение фосфатной группы к олигосахаридной цепи белков, предназначенных в лизосомы. Фракция мембран с промежуточной плотностью содержала ферменты, удаляющие маннозу и присоединяющие N-ацетилглюкозамин к секреторным белкам и к белкам плазматической мембраны. Фракция наименее плотных мембран содержала ферменты, присоединяющие галактозу и сиаловую кислоту. Таким образом, существуют по крайней мере три типа цистерн Гольджи.



СРЕДИННЫЙ КОМПАРТМЕНТ аппарата Гольджи был идентифицирован в лаборатории автора как участок стопки, содержащий ферменты N-ацетилглюкозаминтрансферазы. Для идентификации были привлечены иммуногистохимический анализ и электронная микроскопия. На этой электронной микрофотографии клетки из печени кролика видна стопка Гольджи, состоящая из четырех цистерн. Две центральные цистерны окрашены, что указывает на присутствие в них одного из ферментов, присоединяющих N-ацетилглюкозамин к олигосахаридной цепи гликопротеинов. Для специфического окрашивания использовали сочетание моноклональных антител к этому ферменту и пероксидазы, продукт активности которой и дает черную окраску. Установление локализации N-ацетилглюкозаминтрансфераз в срединном компартменте было существенным этапом в картировании стопок Гольджи. Сразу стало возможным предположить, что фермент, присоединяющий фосфатные группы, локализован в первом, или *цис*-компарimente, а ферменты, присоединяющие галактозу и сиаловую кислоту, в третьем, или *транс*-компарimente.

из разных участков стопок Гольджи имеют разную плотность, то в процессе центрифугирования в градиенте концентрации сахарозы они должны разделяться. Содержимое пробирок изучали последовательно, по каплям, отбирая слои (фракции) и подвергая биохимическому анализу каждую фракцию. Данфи, Фрайс и я показали, что фрагменты цистерн действительно разделяются на две фракции. Более плотные фрагменты содержали большую часть маннозидазы I, тогда как более легкие фрагменты содержали галактозотрансферазы и трансфера-

зы сиаловой кислоты. Мы сделали вывод, что молекулы маннозы отщепляются от олигосахаридов в одной части стопки Гольджи, а затем в другой части той же стопки присоединяются галактоза и сиаловая кислота. Это было первое доказательство того, что в стопках Гольджи имеются биохимически специализированные компартменты.

Наши данные были подтверждены результатами экспериментов с живыми клетками (культивируемыми клетками яичников китайского хомячка), которые заражали вирусом везикуляр-

ного стоматита. Проникнув в клетку, этот вирус узурпирует ее белоксинтезирующий аппарат, так что тот переключается на производство вирусных белков. Вирус везикулярного стоматита содержит гликопротеины одного типа, получившие название G-белка. В результате аппарат Гольджи, который в незараженных клетках содержит сотни различных гликопротеинов, в зараженных клетках заполнен почти исключительно однотипными гликопротеинами, а именно G-белком, путь которого через стопки Гольджи поэтому легко проследить. G-Белок с удаленными первыми молекулами маннозы был найден в более плотной мембранной фракции, содержащей маннозидазу I, а G-белок с присоединенной галактозой — в более легких фракциях, обладающих активностью галактозотрансферазы.

В 1983 г. нами и другими исследователями (а именно Корнфельдом и К. Хиршбергом из Медицинской школы Сент-Луисского университета) было показано, что почти все ферменты гликозилирования ассоциированы с определенными фракциями аппарата Гольджи. Маннозидаза II обнаружилась вместе с GlcNAc-трансферазами в более плотной фракции, где ранее была найдена маннозидаза I. Маннозидазная фракция четко отделялась от той, в которой содержались трансферазы галактозы и сиаловой кислоты. Эти результаты имели большое значение, но еще важнее оказались данные, полученные Корнфельдом и его коллегами: они показали, что ферменты, присоединяющие фосфатные группы к лизосомальным белкам, локализованы в третьем компартменте стопок Гольджи, который имеет еще большую плотность, чем компартмент, содержащий маннозидазу. Стало ясно, что аппарат Гольджи содержит по крайней мере три биохимически специализированных компартмента. На повестку дня встала задача найти место каждого компартмента в стопке Гольджи.

Картирование компартментов

Для того чтобы цистерны аппарата Гольджи разделились на фракции в сахарозном градиенте, стопки должны утратить целостность, так что методы центрифугирования в градиенте плотности неприемлемы для выяснения локализации биохимически охарактеризованных компартментов в интактном аппарате Гольджи. Поэтому, чтобы составить структурную карту аппарата Гольджи, мы обратились к электронной микроскопии интактных клеток. Результаты исследо-

ваний с использованием градиента плотности показывали, что ферменты, ответственные за присоединение фосфатных групп к лизосомальным белкам, ферменты, переносящие GlcNAc, и ферменты, переносящие галактозу, должны находиться в разных цистернах. Для выявления компартментов, содержащих тот или иной фермент, мы решили использовать в качестве маркеров соответствующие трансферазы. Каждый фермент должен избирательно окрашивать «свой» компартмент, который далее можно идентифицировать с помощью электронного микроскопа.

Однако эту так просто формулируемую задачу оказалось не так-то просто решить. Прежде всего каждый фермент следовало получить в полностью очищенном виде, что и представляло главную трудность. Очищенный фермент инъецировали далее лабораторным мышам, у которых вырабатывались антитела против него как против чужеродного вещества. Антитела выделяли и использовали для сложной процедуры, которая в конечном счете давала моноклональные антитела к индивидуальным трансферазам — антитела, взаимодействующие исключительно со «своими» трансферазами. Такие моноклональные антитела, будучи добавлены к клеткам, связывались только с теми цистернами Гольджи, которые содержали соответствующие трансферазы. Эти цистерны выявляли затем с помощью электронного микроскопа, сочетая моноклональные антитела с пероксидазой — ферментом, продукт реакции которого окрашен в черный цвет.

Мы применили описанную методику для выявления GlcNAc-трансферазы I. Выбор этого фермента был обусловлен тем, что он действует в середине пути гликозилирования. Определение физических границ среднего компартмента одновременно очертило бы границы начального и конечного компартментов. Кроме того, к этому времени GlcNAc-трансфераза была получена в чистом виде Хиллом (для других целей). Данфи очистил GlcNAc-трансферазу по методу Хилла, получил моноклональные антитела к ней и применил их в сочетании с пероксидазой. Клетки печени кролика, аппарат Гольджи которых содержал в большинстве случаев 4—5 цистерн, инкубировали с мечеными антителами. Предварительно клетки обрабатывали таким образом, чтобы антитела могли проникнуть через внешнюю клеточную мембрану и достигнуть цитоплазмы. Оказалось, что GlcNAc-трансфераза I сосредоточена в двух-трех цистернах в средней части стопки Гольджи, которые по-

лучили название срединных цистерн (англ. *medial*).

Независимо от результатов центрифугирования в градиенте плотности выявление фермента, переносящего GlcNAc методом окрашивания, прямо подтверждало принцип трех компартментов, поскольку реакция присоединения GlcNAc осуществлялась в срединных цистернах, а не в *цис*- или *транс*-цистернах. Начала вырисовываться искомая карта, связывающая структуру стопок Гольджи с их функцией. Данные, полученные в более ранних исследованиях, проведенных в других лабораториях, позволили заполнить «белые пятна» на этой карте. В 1982 г. (т.е. за два года до обнаружения нами срединных цистерн) Ю. Рот из Женевского университета и Э. Бергер из Бернского университета, используя методы, сходные с применяемыми нами, показали, что ферменты, катализирующие присоединение галактозы, локализованы исключительно в *транс*-цистернах стопок Гольджи. В совокупности их и наши результаты говорили о том, что сначала гликопротеины связывают GlcNAc в срединных цистернах, а затем переходят в *транс*-цистерны, где к ним присоединяются галактоза и, по-видимому, сиаловая кислота. Ферменты, катализирующие присоединение фосфатных групп к цепочкам сахаров лизосомальных ферментов при их входе в аппарат Гольджи, в чистом виде до сих пор не получены, и это не позволяет точно установить их локализацию в стопках Гольджи. Однако есть все основания полагать, что они будут обнаружены в тех цистернах, о которых речи еще не было, — в цистернах *цис*-компартмента.

Почему компартменты?

Вполне возможно, что простая схема, описанная выше, не исчерпывает организацию аппарата Гольджи. Весьма вероятно, что существует более тонкая его компартментализация. Так, например, срединный компартмент, который часто состоит из нескольких цистерн, может быть, по-видимому, подразделен на специализированные субкомпартменты. Дальнейшие исследования покажут, сколько на самом деле функциональных блоков в стопке Гольджи, и наша карта примет, скорее всего, более сложный вид. Однако есть основания думать, что число таких блоков не слишком велико. Видимо, компартментализация аппарата Гольджи — это фундаментальное свойство клеток, необходимое для их функционирования и, следовательно, присущее клет-

кам всех типов. Самые маленькие стопки Гольджи состоят из четырех цистерн. Если функциональная компартментализация сохраняется во всех клетках, то даже в таких стопках должны быть представлены все основные функциональные подразделения и, значит, их существует не более четырех. В стопках из более чем четырех цистерн тот или иной компартмент может быть представлен несколькими цистернами, но дополнительных функциональных блоков в них быть не должно.

Хотя компартментная организация аппарата Гольджи не вызывает в настоящее время никакого сомнения, смысл ее понятен еще не до конца. Компартментная организация обладает рядом «стратегических» преимуществ для процессинга олигосахаридных цепей гликопротеинов. Так, при процессинге лизосомальных белков сохраняются все их маннозные остатки, хотя они проходят через срединные цистерны, где присутствуют ферменты, отщепляющие маннозу. Возможно, это объясняется всего лишь тем, что белки, предназначенные для лизосом, в *цис*-компартменте приобретают фосфатные группы, а фосфатные группы каким-то образом защищают остатки маннозы от действия маннозидаз в срединном компартменте. Наличие маннозных остатков в свою очередь предотвращает присоединение GlcNAc в срединном компартменте и присоединение галактозы и сиаловой кислоты в *транс*-компартменте.

Компартментализация аппарата Гольджи может также облегчать сортировку белков для отправки их по разным адресам. Для функционирования аппарата Гольджи характерно, что белки, предназначенные для разных целей, не разделяются физически, пока не достигнут *транс*-компартмента. Об этом, в частности, говорит тот факт, что белки для секреторных гранул, плазматических мембран и даже для лизосом присоединяют остатки галактозы и сиаловой кислоты только в *транс*-компартменте.

Тем не менее белок может быть распознан и «снабжен ярлыком» для отправки по нужному адресу гораздо раньше. Исследования Корнфельда и его коллег показали, что лизосомальные белки распределяются именно так — в две стадии. На первой стадии в *цис*-компартменте к белку присоединяется фосфатная группа, которая служит «ярлыком» при последующей сортировке. Фермент, переносящий фосфатную группу, узнает лизосомальный белок по какой-то (пока неизвестной) структурной особенности и не переносит фосфат на гликопротеины, предназначенные для отправки в

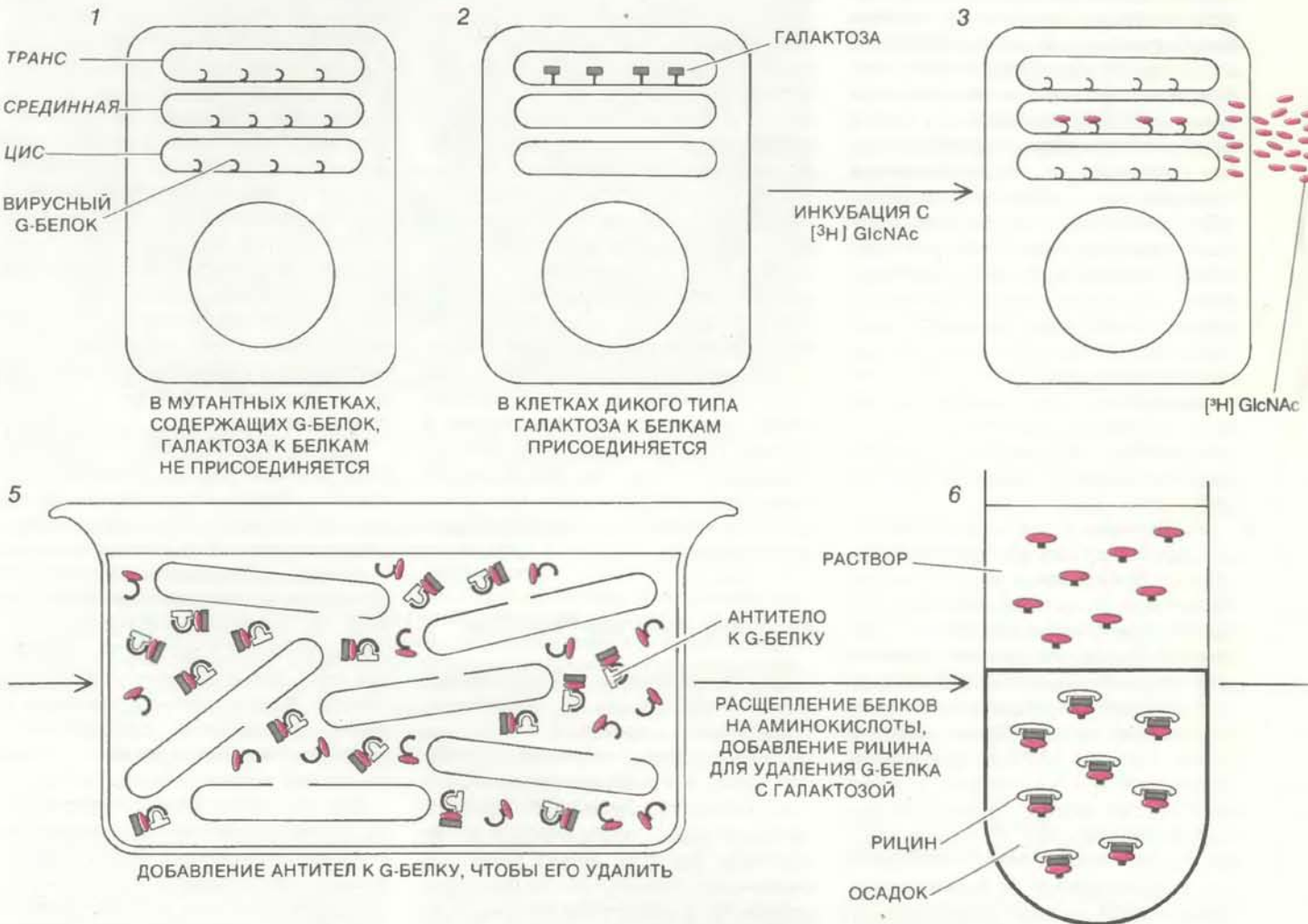
иные компартменты клеток. Ясно, что участком узнавания не является сама олигосахаридная цепь, общая для всех гликопротеинов. На второй стадии снабженные «ярлыком» лизосомальные белки захватываются рецепторной системой, специфичной по отношению к фосфатным группам, и упаковываются в везикулы, которые впоследствии сливаются с лизосомами. Пока неизвестно, каков механизм сортировки белков других типов. Если такое последовательное распределение — общий принцип, то цель компартментной организации аппарата Гольджи, возможно, состоит главным образом в упорядочении последовательного распознавания, сортировки и «адресования» белков по мере их движения через стопку цистерн.

От *цис*-до *транс*-поверхности

Какова бы ни была «сверхзадача» компартментализации аппарата Гольджи, одно можно сказать с уверенностью: чтобы компартментализованная система функционировала, как нужно, каждый гликопротеин должен пройти через все компартменты в строго определенной последовательности. Существуют две основные модели, объясняющие переход белков от *цис*- к *транс*-поверхности стопки. Согласно одной из них, которую можно назвать моделью перемещения цистерн, новые цистерны непрерывно образуются по мере того, как везикулы, поступающие из эндоплазматического ретикулума, сливаются с *цис*-поверхностью стопки. Каждая

новообразованная цистерна перемещается к *транс*-стороне стопки, и по мере ее движения одни операции процессинга внутри нее сменяются другими. Достигнув *транс*-поверхности, цистерна распадается на транспортные везикулы, доставляющие содержащиеся в них белки до места назначения. В рамках этой схемы передача материала между цистернами не происходит, зато цистерны по мере своего движения изменяются биохимически.

До последнего времени эта модель функционирования аппарата Гольджи была наиболее общепринятой, о чем говорит, в частности, тот факт, что *цис*-поверхность часто называли еще формирующейся поверхностью, а *транс*-поверхность — зрелой поверхностью. Когда же была обнаружена



„ПЕРЕПРЫГИВАНИЕ” БЕЛКОВ между компартментами стопки Гольджи было продемонстрировано в лаборатории автора в 1983 г. В этом эксперименте использовались два типа культивируемых клеток яичников китайского хомячка: линия мутантных клеток, в которых отсутствовала реакция присоединения галактозы к гликопротеинам в *транс*-компартементе аппарата Гольджи (1), и клетки дикого типа, т.е. нормальные, способные к реакции присоединения галактозы (2). Мутантные клетки заражали вирусом везикулярного стоматита, и их аппарат Гольджи был заполнен одинаковыми гликопротеинами — вирусным G-белком. И

те и другие клетки инкубировали короткое время с предшественником N-ацетилглюкозамина, меченным радиоактивным изотопом водорода ^3H (3). При этом в срединном компартменте аппарата Гольджи мутантных клеток радиоактивный N-ацетилглюкозамин включался в G-белок. Проводили сливание клеток двух типов (4). После короткой инкубации слившиеся клетки двух типов растворяли в детергенте и из полученного раствора с помощью антител выделяли G-белок (5). Его расщепляли на аминокислоты и добавляли растительный белок рицин, относящийся к классу так называемых лектинов. Рицин, связываясь с галактозой, об-

компартиментализация стопок Гольджи, картина изменилась. Поскольку теперь известно, что каждая группа цистерн имеет характерный биохимический состав, трудно представить себе, как один компартмент превращается в другой. Более привлекательной стала альтернативная гипотеза, согласно которой цистерны остаются на своем месте, а гликопротеины переносятся в направлении от *цис*- к *транс*-стороне стопки с помощью везикул, которые отпочковываются от мембраны цистерны предыдущего компартмента и сливаются с мембраной цистерны следующего компартмента. Правильность этой гипотезы подтверждается рядом косвенных данных. Стопки Гольджи окружены роем мелких пузырьков, о которых известно, что они содержат транспо-

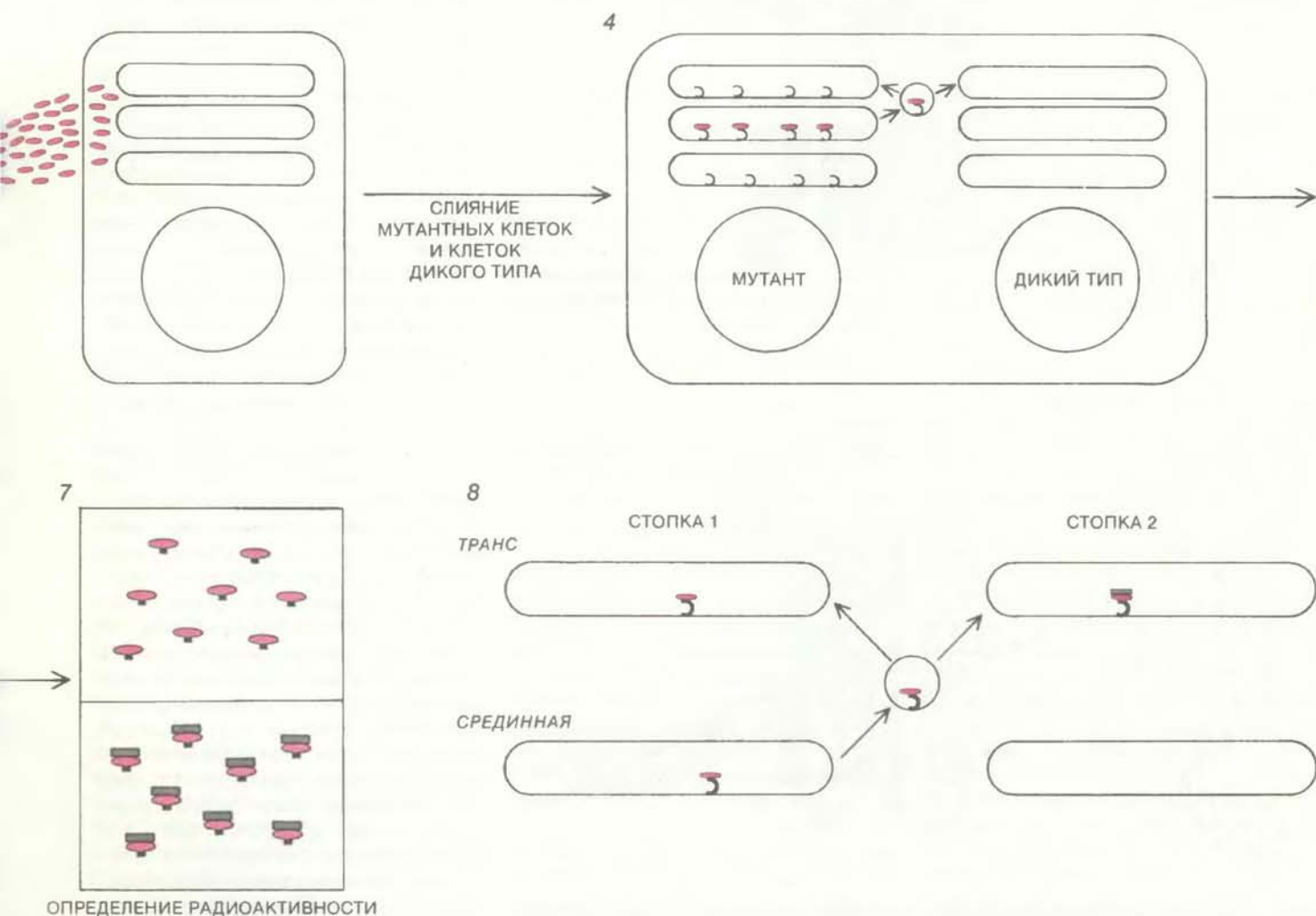
ртируемые белки. Известно также, что транспортные везикулы могут действовать достаточно избирательно, чтобы удалять из цистерн зрелые гликопротеины, не захватывая белки, не завершившие процессинга. Кроме того, везикулы — обычное средство транспорта веществ между другими компартментами клетки.

Как сделать выбор между этими двумя моделями функционирования аппарата Гольджи? Один из путей — ответить на вопрос, могут ли белки «перепрыгивать» из одной стопки в другую. Если гликопротеин начинает свое движение в одной стопке и заканчивает в другой, то, значит, белки переносятся от цистерны к цистерне. Согласно модели перемещения цистерн, такого «перепрыгивания» происходить не должно. К сожалению,

перепрыгивание белков между стопками Гольджи в пределах одной клетки выявить невозможно. Каждая клетка содержит много одинаковых функционирующих стопок Гольджи. Если та или иная молекула гликопротеина обнаруживается в *транс*-компарimente определенной стопки, нет никакой возможности выяснить, поступила ли эта молекула сюда из срединного компартмента той же или другой стопки.

Доказательство «перепрыгивания» белков

Чтобы выявить «перепрыгивание», я создал систему из двух типов клеток, в которых стопки Гольджи функционально различны. Как и при со-



разует преципитат, который легко отделить от жидкой фазы. Рибцином осаждают молекулы G-белка, содержащие галактозу, и в растворе остается G-белок без галактозы (6). Поскольку молекулы G-белка обоих типов несут радиоактивный ^3H , их относительное количество можно определить с помощью сцинтилляционного счетчика. Оказалось, что в слившихся клетках G-белка, содержащего галактозу, примерно столько же, сколько G-белка без галактозы (7). Единственным источником радиоактивного G-белка в этой системе является срединный компартмент стопок Гольджи мутантных клеток, а присоединение к белку га-

лактозы может происходить только в *транс*-компарimente стопок Гольджи клеток дикого типа. Следовательно, содержащие галактозу радиоактивные молекулы G-белка должны были «перепрыгнуть» из срединного компартмента стопок Гольджи мутантных клеток в *транс*-компаримент стопок Гольджи клеток дикого типа (8). Наличие галактозы в 50% молекул G-белка говорит о том, что, покинув срединную цистерну стопки Гольджи, G-белок с равной вероятностью может попасть в *транс*-цистерну как той же самой, так и другой стопки.

ставлении карты аппарата Гольджи, работа велась с культивируемыми клетками яичников китайского хомячка. Были взяты, во-первых, клетки «дикого типа» (нормальные), которые, естественно, обладали способностью к реакции присоединения галактозных остатков, и, во-вторых, мутантная линия клеток, полученная Корнфельдом с коллегами в середине 70-х годов. Мутантные клетки имели генетический дефект, проявляющийся в неспособности к реакции присоединения галактозы в *транс*-компарimente стопок Гольджи. Мутантные клетки заражали вирусом везику-

лярного стоматита. Как указывалось выше, аппарат Гольджи в клетках, зараженных этим вирусом, заполнен почти исключительно одним гликопротеином — G-белком, кодируемым генетическим материалом вируса. Поскольку клетки дикого типа не были заражены вирусом, они не содержали G-белка.

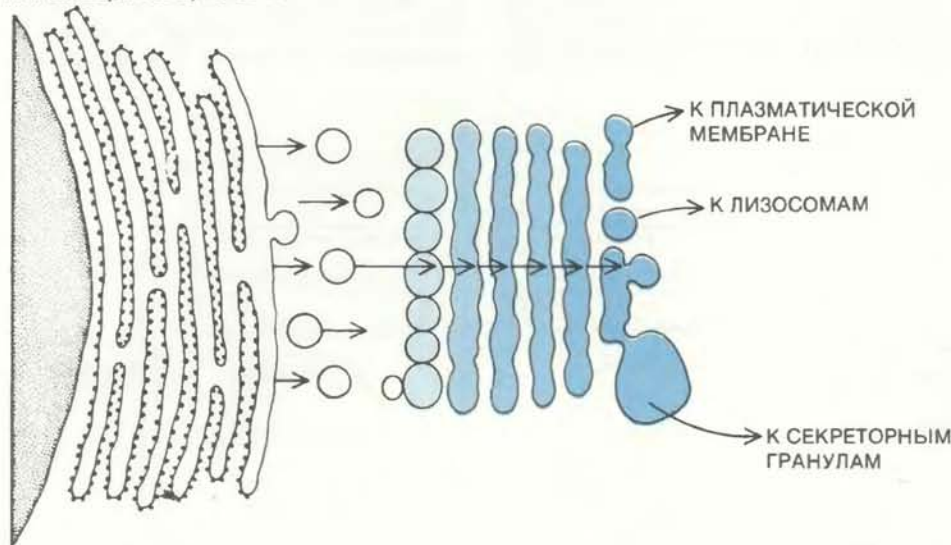
Различием между стопками Гольджи мутантных клеток и клеток дикого типа мы воспользовались, чтобы выяснить, способен ли G-белок перепрыгивать из одних стопок Гольджи в другие. Клетки инкубировали в среде, содержащей предшественник

GlcNAc, меченный радиоактивным изотопом водорода (тритием). В мутантных клетках поглощенный радиоактивный сахар поступал в срединный компартмент стопок Гольджи, где он присоединялся к G-белку. В клетках дикого типа меченый предшественник также захватывался срединным компартментом аппарата Гольджи, но там не было G-белка, с которым он мог бы связаться. Сразу после этого осуществляли слияние нормальных и мутантных клеток; в их общей цитоплазме имелись как мутантные стопки Гольджи, так и нормальные.

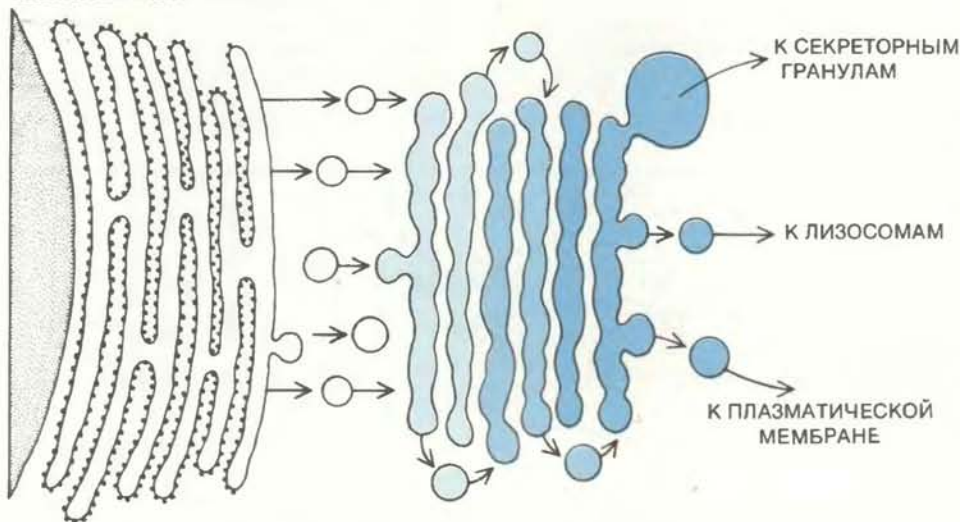
Исходно весь радиоактивный G-белок содержался в мутантных стопках Гольджи. Будет ли G-белок перепрыгивать в нормальные стопки клеток дикого типа? Для выяснения этого делалась следующая сложная процедура. Слившиеся клетки некоторое время инкубировали, чтобы ожидаемое перепрыгивание успело произойти, затем растворяли в детергенте и из полученного экстракта выделяли G-белок с помощью антител к нему. Молекулы G-белка, присоединившие галактозу, отделяли от G-белка без галактозы с помощью особого растительного белка, связывающегося только с содержащими галактозу олигосахаридными цепями. Поскольку и те и другие молекулы G-белка несли меченый GlcNAc, то относительное количество их можно было определить с помощью сцинтилляционного счетчика для измерения радиоактивности.

Какую информацию можно было получить в результате такого эксперимента? Единственным источником радиоактивного G-белка в этих условиях был срединный компартмент стопок Гольджи мутантных клеток — участок, где к G-белку присоединялся радиоактивный GlcNAc. А галактоза могла присоединяться только в *транс*-компарimente стопок, происходящих из клеток дикого типа. Следовательно, если окажется, что какая-то часть радиоактивного G-белка содержит галактозу, то, значит, он перепрыгнул из срединных цистерн стопок мутантных клеток в *транс*-цистерны стопок клеток дикого типа. Если же в молекулах G-белка галактозы не обнаружится, то это будет означать, что G-белок проследовал в *транс*-цистерны стопок мутантных клеток. (Было известно, что, несмотря на неспособность осуществлять реакцию присоединения галактозы, в стопках Гольджи мутантных клеток происходит нормальный перенос белков между цистернами). Итак, эксперимент должен был выявить перепрыгивание, причем по соотношению двух типов молекул G-

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЦИСТЕРН



ВЕЗИКУЛЯРНЫЙ ТРАНСПОРТ

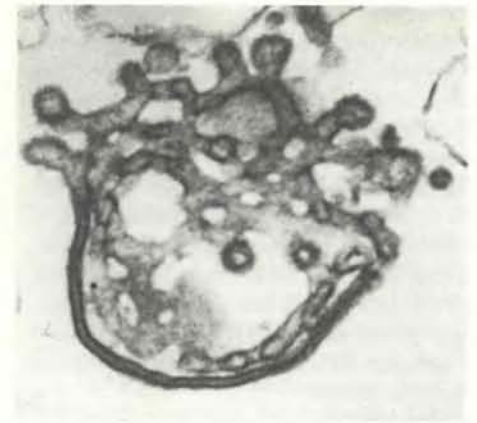
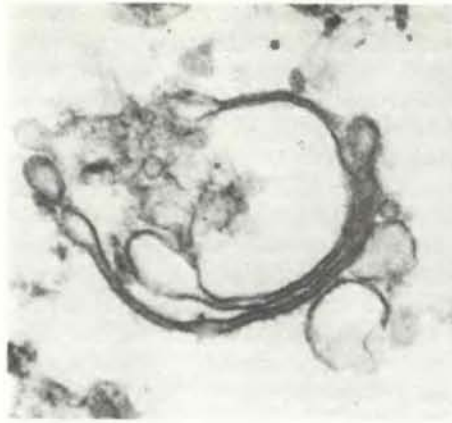


ДВЕ МОДЕЛИ были предложены для объяснения механизма продвижения гликопротеинов через стопки Гольджи. В модели перемещения цистерн (вверху) новые цистерны формируются путем слияния везикул на *цис*-стороне стопки и движутся вдоль стопки, в то время как на их месте образуются новые. Весь процессинг белка происходит внутри одной и той же цистерны: по мере ее перемещения одни реакции сменяются другими. На *транс*-стороне стопки цистерна распадается на везикулы, которые доставляют гликопротеины по назначению. Согласно модели везикулярного транспорта (внизу), цистерны не перемещаются, гликопротеины переносятся от компартмента к компартменту с помощью везикул, отпочковывающихся от цистерн. Прежде модель перемещения цистерн была общепринятой. Обнаруженное перепрыгивание белков из одной стопки Гольджи в другую противоречит этой модели и говорит о том, что гликопротеины переносятся через стопки, скорее всего, с помощью везикул.

белка (содержащего и не содержащего галактозу) можно было оценить частоту перепрыгивания.

К моему изумлению, я обнаружил, что перепрыгивание не только существует, но является столь же правилом, сколь и исключением: около половины радиоактивного G-белка содержало галактозу. Из этого следовало, что G-белок, покинув срединный компартмент мутантных стопок, с равной вероятностью может попасть в мутантные стопки и в стопки дикого типа. Но случайное перепрыгивание в корне противоречит модели перемещения цистерн. Отпадает также необходимость в упорядоченном движении гликопротеинов в пределах одной и той же стопки. На самом деле они, по-видимому, переносятся от одного компартмента к другому с помощью везикул, которые при каждом акте переноса могут покидать «свою» стопку. Для того чтобы белки проходили все компартменты в правильной последовательности, отпочковывающиеся везикулы должны обладать способностью находить и узнавать цистерны следующего по порядку компартмента. Поскольку стопки Гольджи рассеяны по всей цитоплазме, узнавание не может быть основано на пространственной близости компартментов или на общей организации цитоплазмы.

В дальнейших исследованиях начала складываться картина везикулярной транспортной системы. Используя такие же методы, как и при изучении переноса белков из срединного в *транс*-компартмент, мы показали, что белки могут «прыгать» из *цис*- в срединные цистерны стопок. Когда G-белок попадает в срединный компартмент, к нему присоединяется GlcNAc. Тот факт, что белок может «выпрыгивать» в участок, где происходит присоединение GlcNAc, и затем «выпрыгивать» из него, независимо доказывает, что в стопке Гольджи имеются три функционально различных компартмента и что перемещение через последовательность этих компартментов осуществляется посредством диффундирующих везикул. Функциональная карта, составленная по результатам экспериментов с перепрыгиванием, полностью соответствует биохимической карте, составленной по результатам экспериментов с центрифугированием в градиенте плотности, и структурной карте, полученной при электронно-микроскопических исследованиях. Мы установили также, что везикулярный транспорт представляет собой однонаправленный процесс. Так, например, белок, достигший *транс*-компартмента, не может вернуться в срединный компартмент.



ВЕЗИКУЛЫ ОТДЕЛЯЮТСЯ ОТ ЦИСТЕРН в бесклеточной системе, разработанной автором и его коллегами. В препарате стопок Гольджи, выделенных с помощью центрифугирования, «облако» везикул, которое в интактной клетке окружает цистерны, отсутствует (*слева*). В присутствии цитоплазматических ферментов и АТФ в качестве источника энергии наблюдается регенерация облака везикул вокруг цистерн (*справа*). В настоящее время предпринимаются попытки идентифицировать специфические ферменты, необходимые для образования везикул; результаты этих исследований должны показать, как функционирует система транспорта гликопротеинов в интактных стопках Гольджи и в других участках клетки.

Перепрыгивание кажется противоречивым

Коль скоро гликопротеины могут эффективно переноситься из срединного компартмента одних стопок в *транс*-компартмент других стопок, относительно удаленных от первых в цитоплазме, вызывает недоумение, почему компартменты аппарата Гольджи вообще связаны между собой и образуют характерные стопки. Хотя на этот вопрос еще нет ответа, я предполагаю, что стопочная организация аппарата Гольджи необходима, поскольку в некоторых клетках везикулы не могут покидать стопку (а при переходе в другую стопку этот этап, естественно, обязателен). Есть основание считать, что, когда везикула отпочковывается от мембраны цистерны, она — в определенном смысле — перестает принадлежать данной стопке. Отделение, однако, не ведет автоматически к перепрыгиванию. Для перепрыгивания везикула не только должна отделиться от стопки, но и отойти от нее и переместиться к другой стопке.

В клетках некоторых типов в цитоплазме имеется сетевидная система фибрилл (волокон). В таких клетках везикулы способны отделяться от стопки, но не могут полностью от нее отойти. В этих условиях (так, вероятно, обстоит дело в большинстве клеток) транспорт между далеко отстоящими друг от друга компартментами будет очень медленным, если вообще окажется возможным. В стопке же компартменты расположены тесно, что и обеспечивает быстроту везикулярного транспорта между ними. Зато в клетках, цитоплазма которых

так не организована, возможна быстрая диффузия и везикулы, отпочковавшись от мембраны цистерн, автоматически покидают стопку, что является предпосылкой перепрыгивания. Независимо от того, могут или нет везикулы отойти от стопки, сама по себе их способность отделяться от цистерн и находить нужные мембраны — главное в модели везикулярного транспорта.

Выяснение деталей транспортной системы, несомненно, существенно и для понимания функционирования других отделов клетки. Помимо транспортировки новообразованных гликопротеинов от эндоплазматического ретикулума к месту назначения через стопки Гольджи везикулы играют также главную роль в эндоцитозе — транспорте веществ с поверхности клеток в лизосомы; этот процесс осуществляется через промежуточный компартмент — эндосомы. (См. Simons K., Garoff H., Helenius A. How an Animal Virus Gets into and out of Its Host Cell, "Scientific American", February, 1982.) Каждый раз при изучении транспорта возникают одни и те же вопросы. Что заставляет везикулы отпочковываться от «родных» мембран? Каким образом везикулы данного типа находят нужную мишень? Что заставляет везикулы сливаться с мембранами мишеней, изливая внутрь свое содержимое?

Я надеюсь, что ответы на некоторые из этих вопросов удастся получить в самом скором времени, так как мы с коллегами разработали бесклеточную систему, в которой белки переносятся между цистернами стопок Гольджи, выделенных из клеток. Это первый случай внеклеточной рекон-

струкции системы везикулярного транспорта, что следует считать решающим этапом в расшифровке молекулярных механизмов транспорта белков. Транспорт в бесклеточной системе *in vitro* впервые был осуществлен Фрайсом и мною в 1980 г. Недавно У. Балч, У. Браэлл (работавшие в моей лаборатории по окончании аспирантуры), студент-дипломник Б. Глик и я использовали бесклеточную систему с целью определить, какие химические условия необходимы для образования везикул.

Мы получали стопки Гольджи путем центрифугирования в градиенте плотности сахарозы; при этом транспортные везикулы, образующие в интактной клетке «облака» вокруг цистерн, отделялись от аппарата Гольд-

жи. Изолированные стопки Гольджи инкубировали в условиях, способствующих возобновлению транспорта между цистернами, для чего стопки помещали в среду, содержащую неочищенную цитоплазматическую фракцию и АТФ в качестве источника энергии. Наблюдалось появление новых транспортных везикул, которые обладали способностью к переносу белков в следующие компартменты. В дальнейшем мы предполагаем выделить из цитоплазматической фракции ферменты, необходимые для отпочковывания везикул, для их адресования и для слияния с мембранами, и установить роль каждого из них в процессе транспорта.

Итак, за последние пять лет достигнуты существенные успехи в понима-

нии структуры и функционирования аппарата Гольджи. Твердо установлено, что в аппарате Гольджи имеются три функциональных компартмента и что между компартментами происходит последовательный перенос гликопротеинов, который осуществляется везикулами, способными к высокоспецифичному распознаванию мембран. Теперь внимание исследователей сосредоточивается на самих везикулах, и вскоре мы, несомненно, узнаем много нового о природе распознавания мембран. Поскольку везикулярный транспорт играет огромную роль в жизнедеятельности клетки, изучение компартментной организации аппарата Гольджи прольет свет на фундаментальные механизмы роста и деления клеток.

Наука и общество

Часы-пульсар

СЧИТАЕТСЯ, что пульсар представляет собой нейтронную звезду, излучающую, подобно маяку, узкий пучок электромагнитной радиации. Луч, «обшаривающий» космос, периодически «задевает» Землю и воспринимается как последовательность импульсов. От некоторых пульсаров импульсы приходят с такой регулярностью, что эти звезды можно рассматривать как настоящие космические часы. Одни из этих «часов» оказались удивительно точными. Речь идет о пульсаре PSR 1937 + 21 с наименьшим известным периодом: он вращается со скоростью 642 оборота в секунду (один оборот за 1,56 мс). По мнению астрономов, ведущих наблюдение за этим пульсаром со времени его открытия в 1982 г., пульсар «отсчитывает» время так же точно и надежно, как лучшие из атомных часов.

Результаты наблюдений опубликованы в журнале «Nature» М. Дэвисом из обсерватории Аресибо, Дж. Тейлором и Дж. Уайсбергом из Принстонского университета и Д. Бэкером из Калифорнийского университета в Беркли. Радиоимпульсы, идущие от PSR 1937 + 21, принимаются 305-метровым радиотелескопом обсерватории Аресибо. Время прихода импульсов отмечается по рубидиевым часам, показания которых затем сверяются с эталонными часами в Военно-морской обсерватории в Вашингтоне, представляющими собой набор цезиевых часов. Для повышения точности отсчеты этих часов усредняются.

Регулярность следования импульсов непосредственно не заметна. Подобно своим собратьям, PSR 1937 + 21 по мере излучения энергии постепенно замедляет вращение; скорость этого замедления настолько равномерна, что может быть легко учтена. Однако при прохождении излучения через межпланетную и межзвездную среду, а также в гравитационном поле Солнца возникает задержка импульсов, имеющая непостоянный характер. Изменения скорости движения Земли по орбите также влияют на время прибытия импульсов.

Все эти эффекты, связанные с тем, что наблюдения ведутся на Земле, должны быть рассчитаны и учтены с помощью математической модели, которая превращает время прибытия в «динамическое время относительно барицентра», отнесенное к центру масс Солнечной системы. В этой системе отсчета период следования импульсов оказывается исключительно стабильным. За год расхождение с эталоном Военно-морской обсерватории составляет лишь одну микросекунду, что сравнимо с точностью лучших отдельных цезиевых часов.

Благодаря своей высокой точности «часы-пульсар» могут быть использованы для более детальной проверки космологических теорий. Ряд теорий утверждает, что хаотические процессы в течение доли секунды после начала расширения Вселенной создали в космосе фоновое гравитационное излучение. (В соответствии с общей теорией относительности тело, движущееся с ускорением, излучает энергию

в виде гравитационных волн. Эти волны, если они существуют, настолько слабы, что до сих пор их не удалось обнаружить прямыми измерениями.) Расширение и сжатие пространства-времени при прохождении гравитационной волны должны, по всей видимости, создавать изменения во времени прибытия сигналов пульсаров, причем более интенсивная гравитационная волна должна оказывать на импульсы большее влияние.

Постоянство — в пределах одной микросекунды в год — импульсов, идущих от PSR 1937 + 21, определяет верхний предел для амплитуды гипотетического фонового гравитационного излучения. Этот предел не противоречит теоретическим предсказаниям, поскольку превышает предсказываемые величины. Однако технические усовершенствования и продолжающиеся наблюдения должны позволить Бэкеру и его коллегам понизить величину предела на два-три порядка и использовать новый результат для проверки теории.

Этот оптимистичный вывод предполагает, что сам пульсар останется стабильным. Многие пульсары испытывают так называемые «сбои» — быстрое увеличение частоты повторения импульсов, за которым следует более длительный период возвращения к первоначальному режиму. Кроме того, установление верхнего предела для интенсивности фонового гравитационного излучения не является подтверждением того, что фоновое излучение существует. Такое подтверждение нельзя получить из наблюдений за одним пульсаром, поскольку всякое изменение посылаемого им сигнала может быть приписано возмущению неизвестного вида, про-

исходящему в самой звезде. Для того чтобы продемонстрировать наличие фонового гравитационного излучения, астрономы должны найти другие «миллисекундные» пульсары и показать, что изменения их сигналов коррелируют между собой. Каждый такой пульсар должен быть не менее «точен» и «надежен», чем PSR 1937+21.

Ровная ли дорога?

В ПОСЛЕДНЕЕ время много внимания уделяется проблемам эволюции на молекулярном уровне.* Среди новейших представлений центральное место занимает концепция молекулярных часов. Суть ее в том, что если скорость изменения генетического материала, которое происходит в результате случайных мутаций, на протяжении длительных периодов времени относительно постоянна, то по числу замен нуклеотидов в ДНК можно судить о временном ходе эволюции и по нуклеотидным различиям между видами судить о давности их дивергенции.

Но есть и иная точка зрения. Дж. Гиллеспи из Калифорнийского университета в Дейвисе заново внимательно изучил имеющиеся генетические данные и предложил другую их интерпретацию, которая вызвала горячие споры. В статье, опубликованной в журнале «*Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*», он пишет, что разработал новую математическую методику для описания сложной динамики молекулярных изменений. Гиллеспи воспользовался сводками Фонда медико-биологических исследований в Вашингтоне (округ Колумбия) и проанализировал своим методом данные об аминокислотных последовательностях нескольких белков, в том числе цитохрома *c* и гемоглобина, у различных млекопитающих, включая человека, кита, корову, а также кролика и других грызунов. (Поскольку аминокислотная последовательность белка кодируется последовательностью нуклеотидов в ДНК, по этим данным можно было определить скорость изменения генов.) Гиллеспи пришел к выводу, что постоянство генетических изменений кажущееся, а на самом деле имеют место флуктуации,

которые при грубом усреднении за большие промежутки времени нивелируются. Эволюция, по Гиллеспи, происходит «скачками», причем вспяжки генетических изменений отражают изменения внешней среды.

Представление о постоянстве темпов молекулярной эволюции лежит в основе теории нейтральности, согласно которой большинство мутаций нейтральны, т.е. ни вредны, ни полезны для организма, и в процессе эволюции на молекулярном уровне преобладает накопление нейтральных мутаций. Исходя из этого, некоторые молекулярные биологи утверждают, что хотя естественный отбор, несомненно, действует на уровне организмов, на молекулярном уровне он фактически неощутим. В гипотезе об эволюции «скачками» предполагается, что естественный отбор может действовать и на молекулярном уровне через давление на уровне организмов.

Как возникает метастаз

ОБРАЗОВАНИЕ метастаза раковой опухоли начинается с того, что одна из опухолевых клеток отделяется от «родной» ткани. Форма этой клетки изменяется (обычно клетка становится округлой), она перемещается и на новом месте размножается, так что возникает еще одна опухоль. Каким образом клетка покидает свое место? Недавно появились данные, отчасти отвечающие на этот вопрос.

В нормальной, здоровой ткани клетки скрепляются в единое целое и удерживаются на месте различными гликопротеинами — белками, имеющими в своем составе углеводный компонент. Таким связующим материалом является фибронектин, состоящий из довольно сложных крупных молекул, которые синтезируются внутри отдельных клеток и выделяются в межклеточное пространство. Эти молекулы образуют сеть, связующую клетки и компоненты межклеточного вещества. Молекулы фибронектина не просто прилипают к поверхности клеток, а связываются в специфическом участке со сложным белком, погруженным в клеточную мембрану. Этот белок пронизывает мембрану насквозь и соединен внутри клетки с белками цитоскелета, который придает клетке форму, служа ей каркасом (подобно тому, как вигвам держит форму благодаря жердям, на которые он натян).

Для того чтобы возник метастаз, в первую очередь должна нарушиться связь между опухолевой клеткой и фибронектином. Когда это случится, клетка сможет покинуть ткань и по-

пасть в кровяное русло или лимфатическую систему. Вен Тьенчен и Йинк Мэйчен из Школы медицины и стоматологии Джорджтаунского университета, С. Парсонс и Дж. Парсонс из Медицинской школы Виргинского университета изучали процесс отделения клетки от ткани в культуре фибробластов (клеток соединительной ткани) куриного эмбриона. Клетки заражали чувствительным к температуре штаммом вируса саркомы Рауса (RSV). Этот ретровирус вызывает у кур рак соединительной ткани. При температуре 41 °C RSV теряет способность к репликации, и при такой температуре никаких изменений в культуре клеток не наблюдалось. А при 37 °C, когда RSV может размножаться, клетки округлялись, и в культуральной среде, которая содержала флуоресцирующее вещество, появлялись темные пятна, что свидетельствовало о разрушении фибронектина. Желая убедиться в том, что этот белок действительно разрушается, исследователи ввели в него радиоактивную метку и обнаружили в культуральной среде фрагменты фибронектина, несущие метку. При сравнении расположения темных пятен с локализацией характерных «розеток» — точек контакта, которые были визуализированы с помощью флуоресцентных антител, — оказалось, что деградация фибронектина происходила как раз в контактных участках. Значит, снаружи трансформированных клеток возле точек контакта действовал какой-то фермент, разрушающий фибронектин.

Какие события или факторы внутри трансформированных фибробластов могут иметь отношение к этому ферменту? Внимание исследователей привлек другой фермент — белок *pp60src*, являющийся продуктом онкогена, содержащегося в RSV. Эксперимент, описанный выше, повторили, взяв для иммунофлуоресценции моноклональные антитела к *pp60src*. При 37 °C фермент мигрировал точно в «розетки» контактных участков (так же как и в другие участки, называемые фокусами адгезии). Опять-таки клетки округлялись и вблизи точек контакта происходила деградация фибронектина. В контрольном эксперименте с незараженными фибробластами изменения формы клеток не наблюдалось, вирусный белок *pp60src* отсутствовал и фибронектин не разрушался. Исследователи пришли к выводу, что фермент, разрушающий фибронектин, без вирусного фермента не действует и трансформированные фибробласты не могут высвободиться из фибронектиновой сети.

* См., например, Стеббинс Л., Айала Ф. Эволюция дарвинизма, «В мире науки», 1985, №9; Волькенштейн М. В. Биологическая эволюция и эволюция макромолекул, «Природа», 1985, №6. — *Прим. ред.*

Биметаллические катализаторы

Скорости многих химических реакций удастся регулировать, изменяя состав мельчайших скоплений (кластеров)

из атомов металлов, используемых в качестве катализаторов.

Такие кластеры уже применяют при переработке нефти

ДЖОН Г. ЗИНФЕЛЬТ

В 1817 г. английский химик Гемфри Дэви обнаружил удивительное свойство платины. Оказалось, что в присутствии этого металла кислород мгновенно и часто со взрывом реагирует с другими газами, такими, как водород, монооксид углерода и различные газообразные углеводороды. Все эти превращения могут протекать и в отсутствие платины, но требуют гораздо более высоких температур. Под действием платины из исходных веществ образовались вода и диоксид углерода, но сама платина при этом не расходовалась. Опыты Дэви служат наглядной иллюстрацией явления, называемого катализом. Этот термин (от греческого *katalysis* — «разрушение») впервые в 1836 г. ввел шведский химик Йенс Якоб Берцелиус. Хотя Берцелиус сразу же оценил значение каталитических превращений, теоретические основы явления оставались непонятными еще многие годы. Это надолго задержало развитие науки о катализе и, естественно, тормозило внедрение каталитических реакций в практику. Решающие перемены произошли на рубеже нашего века. Именно тогда немецкий химик Вильгельм Оствальд высказал мысль, что катализатор влияет только на скорость реакции; химические превращения могут протекать и в отсутствие катализатора, хотя и значительно медленнее.

Идеи Оствальда оказались благоприятной средой для бурного расцвета теории и практики катализа. В наши дни катализ лежит в основе множества технологических процессов, с помощью которых производят важнейшие материалы: от удобренных до синтетических волокон, в том числе такие продукты нефтепереработки, как бензин и мазут. В данной статье мы остановимся на ряде работ, выполненных за последние двадцать лет в Exxon Research Laboratories при участии автора. Свои усилия мы сосредоточили на изучении так называемых биметаллических катализаторов, т.е. катализаторов, состоящих из двух металлов. Оказалось, что в тех случаях,

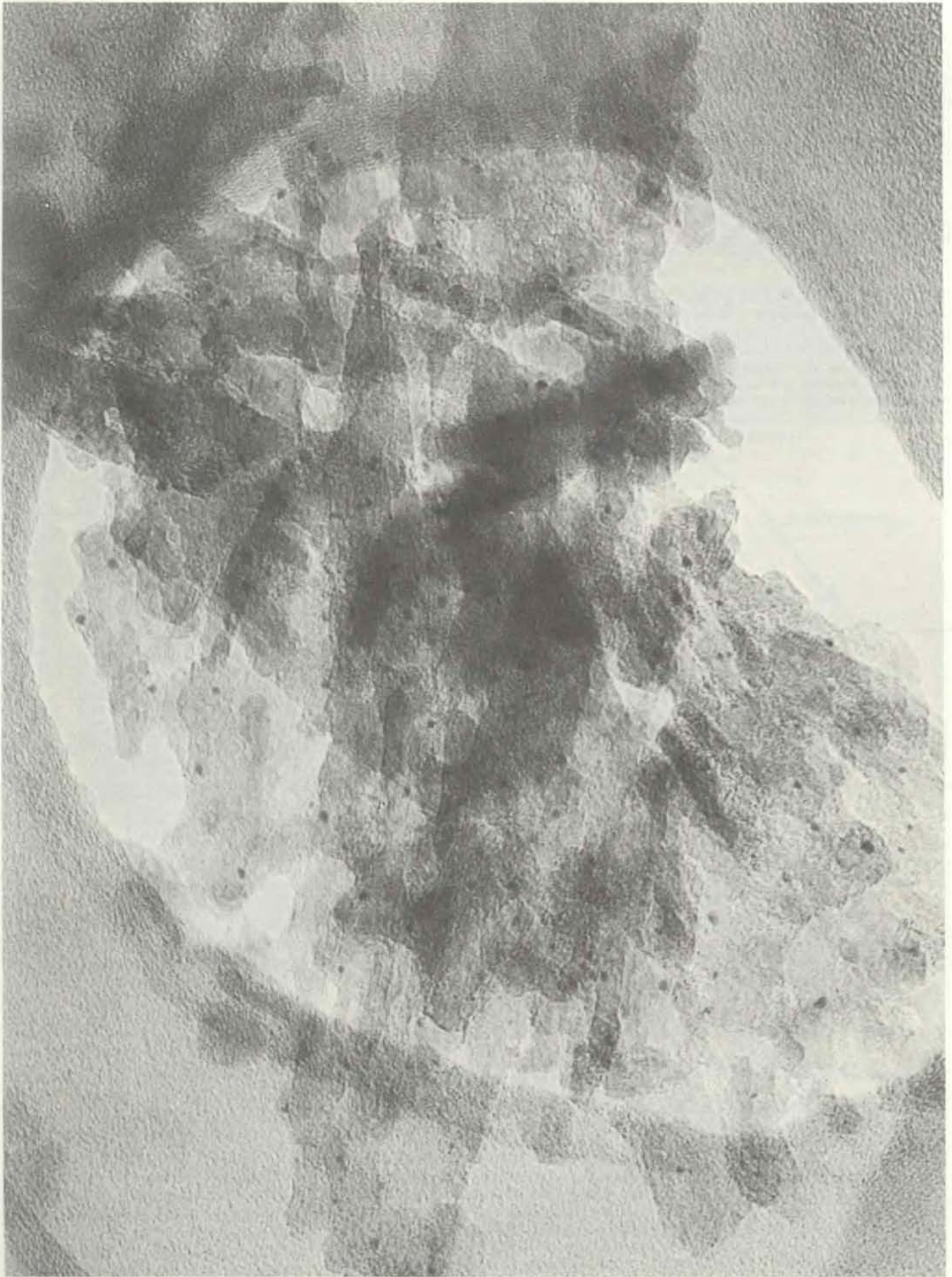
когда одна молекула может принимать участие в нескольких реакциях, введение второго металла в катализатор подавляет побочные реакции, так что выход наиболее ценных продуктов становится максимальным. Мы показали, что достаточно эффективный катализатор можно приготовить даже из таких металлов, которые при смешивании друг с другом не образуют сплава. Итогом наших работ стало открытие нового класса катализаторов, содержащих биметаллические кластеры, которые представляют собой частицы размерами от 10 до 50 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$).

Внедрение биметаллических кластеров уже принесло громадную пользу при переработке нефти. Так, по нашим данным, в присутствии платиноиридиевых кластеров высокооктановые компоненты бензина (ароматические углеводороды типа толуола или ксилолов) образуются значительно быстрее, чем на традиционных катализаторах, в которых кластеры состоят только из атомов платины. Хорошо известно, что, чем выше октановое число бензина, тем реже происходят «удары» в двигателях внутреннего сгорания. Ударные волны возникают при детонации, которая мешает равномерному сгоранию смеси бензина и воздуха и в конечном счете снижает мощность двигателя. Для борьбы с детонацией следует повышать октановое число бензина. До недавнего времени с этой целью в бензин добавляли тетраэтилсвинец. Но улучшить качество бензина можно и другим способом — повысив содержание в нем ароматических углеводородов. Именно такой эффект дает разработанный нами биметаллический катализатор. Его можно применять либо отдельно, либо вместе с другими катализаторами. Наша разработка стала поэтому решающим звеном в создании новой технологической схемы получения высокооктанового бензина, требующего незначительной добавки тетраэтилсвинца или вовсе не содержащего этой вредной примеси.

РАБОТЫ, о которых идет речь, относятся к области так называемого гетерогенного катализа, когда реагирующие молекулы и катализатор находятся в различных фазах. (В других случаях катализатор и реагирующие молекулы находятся в одной фазе, обычно в жидком растворе. Это гомогенный катализ.) Обычно при гетерогенном катализе вещество в жидкой или газовой фазе пропускают через слой частиц катализатора. Широкое распространение получили катализаторы на носителях, т.е. такие, у которых мельчайшие металлические кластеры внедрены в частицы пористого материала. В зависимости от конкретного процесса размер частиц носителя может составлять от долей миллиметра до нескольких миллиметров. В качестве носителей обычно используют пористые оксиды типа оксидов алюминия (Al_2O_3) или кремния (SiO_2). Средний диаметр пор таких материалов составляет около 100 Å. Кластеры металлов закрепляются на стенках этих пор и по размерам должны быть, естественно, меньше сечения пор носителя.

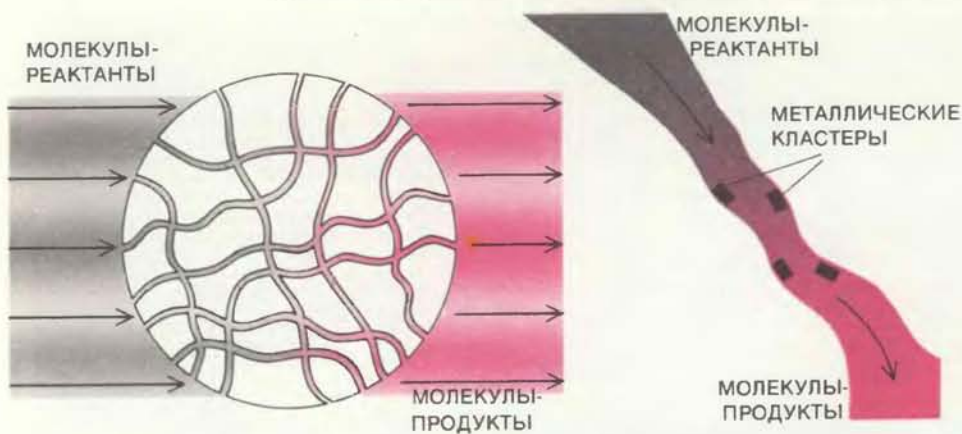
По мере того как поток газа проходит через слой катализатора, реагирующие молекулы диффундируют в поры частиц носителя и адсорбируются на поверхности металлических кластеров. Если адсорбция сопровождается химическим взаимодействием реагирующей молекулы с металлическим кластером, т.е. происходит хемосорбция, то возникает химическая связь между реагентом и активным центром поверхности катализатора. Активный центр может представлять собой как отдельный атом, так и группу атомов. В последнем случае это могут быть либо атомы одного элемента, и тогда речь идет о кластерах какого-то индивидуального металла, либо атомы различных элементов, как, например, у биметаллического кластера.

Химическое соединение — продукт хемосорбции на поверхности кластеров подвергается превращениям с образованием различных по своим хи-



ПЛАТИНОИРИДИЕВЫЕ КЛАСТЕРЫ на этой электронной микрофотографии проявляются в виде черных точек. Кластеры находятся на гранулах высокопористого оксида алюминия. Такие кластерные катализаторы применяются при получении из нефтяного сырья ароматических углеводородов. В состав кластеров входят металлы двух ти-

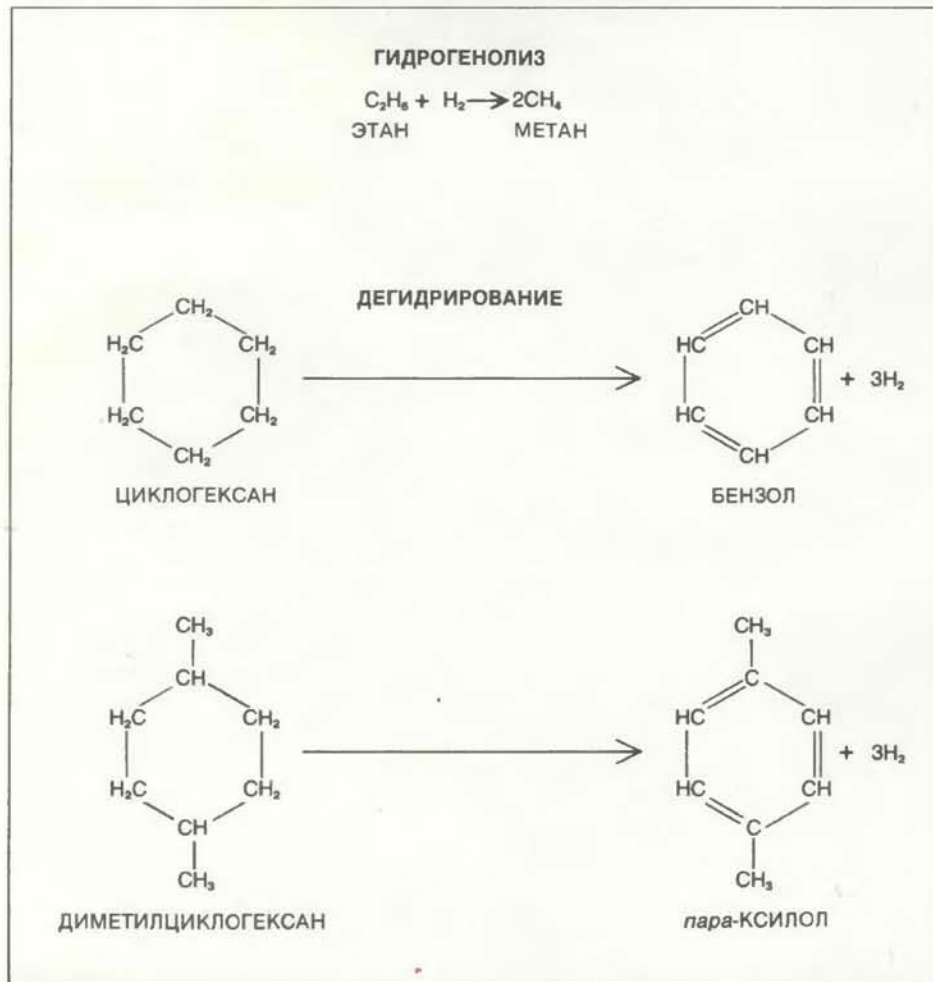
пов, поэтому каждый кластер представляет собой самостоятельный биметаллический катализатор, способный ускорять химические реакции. Кластеры образованы частицами размером около 10 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Светлое овальное пятно на снимке — углубление в держателе образца.



ПРОНИЦАЕМАЯ ДЛЯ РЕАГИРУЮЩИХ МОЛЕКУЛ ГРАНУЛА (*слева*) пронизана порами, изображенными в виде разветвленных линий. Металлические кластеры закрепляются на стенках (*справа*). Проходя через поры, молекулы адсорбируются на поверхности кластеров и подвергаются разнообразным химическим превращениям. Молекулы конечного продукта десорбируются и диффундируют из пор. В ходе реакции кластеры не расходятся и поэтому многократно участвуют в одной и той же реакции.

мическим свойствам молекул, которые постепенно десорбируются с поверхности кластеров. Продукты реакции диффундируют от активных центров через систему пор в поток газа, текущий в пространстве между частицами катализатора. Десорбция продуктов с поверхности металлического кластера освобождает активный центр для участия в последующих химических превращениях. Благодаря этому активный центр многократно участвует в реакции. В ходе реакции исходная газовая смесь, проходящая через слой катализатора, обедняется молекулами-реактантами и обогащается молекулами-продуктами и ее состав изменяется. Активность катализатора, ускоряющего этот процесс, принято оценивать по изменению скорости химической реакции.

Чтобы получить представление о том, какие факторы определяют каталитическую активность того или иного металла, можно выбрать ряд металлов и определить характер изменения активности вдоль этого ряда в какой-нибудь одной реакции. Плодотворной оказалась, например, попытка сравнить между собой каталитическую активность различных металлов при гидрогенолизе углеводородов. Суть этой реакции заключается в том, что в молекуле исходного углеводорода разрываются связи углерод-углерод, к местам разрыва присоединяются атомы водорода и таким образом получают новые углеводороды. Наиболее простой пример подобных превращений — реакция между молекулами этана (C_2H_6) и молекулой водорода (H_2) с образованием двух молекул метана (CH_4). Впервые эту реакцию на никелевых, кобальтовых и железных катализаторах исследовал Х. Тейлор со своими коллегами в Принстонском университете. Мы расширили круг катализаторов и показали, что при гидрогенолизе углеводородов каталитическая активность металла может необычайно резко меняться в зависимости от его природы.



ПРЕВРАЩЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ играют важную роль в производстве нефтепродуктов. В лаборатории их используют для определения эффективности металлических и биметаллических катализаторов. Одна из таких модельных реакций — гидрогенолиз углеводородов (*вверху*). При гидрогенолизе связи углерод—углерод в молекулах углеводородов разрываются и к ним присоединяются атомы водорода. Так возникают новые углеводородные молекулы. В приведенном примере этан реагирует с водородом с образованием метана. Другой важный класс химических реакций — дегидрирование углеводородов (*внизу*). В ходе этих реакций рвутся связи углерод—водород и выделяется водород. Типичное превращение такого типа — дегидрирование циклогексана до бензола. Как при гидрогенолизе этана, так и при дегидрировании циклогексана скорость реакции зависит от состава катализатора, поэтому обе реакции можно использовать для исследования химических свойств катализаторов. Дегидрирование играет большую роль при получении ароматических углеводородов, например молекул типа *p*-ксилола, обладающих высокими антидетонационными свойствами.

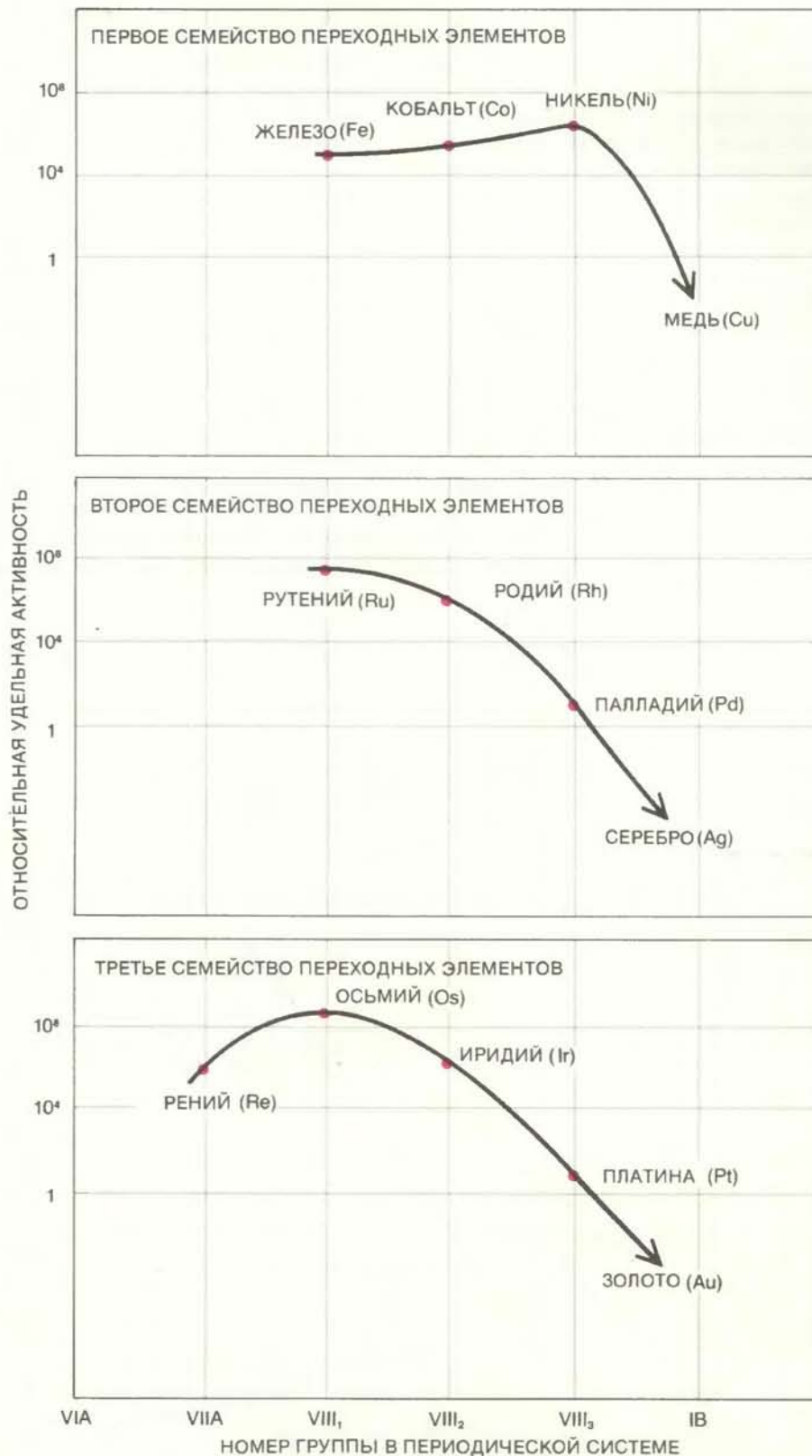
ВЫПОЛНЕННЫЕ нами измерения каталитической активности металлических катализаторов в гидрогенолизе оказали важную помощь при исследовании селективности биметаллических катализаторов. В этих работах мы опирались на периодическую систему элементов. Напомним, что в периодической системе элементы, расположенные в вертикальных колонках, образуют группы, а в горизонтальных рядах — периоды. Элементы одной группы довольно близки по своим химическим свойствам, а у элементов одного периода эти свойства закономерно изменяются от

элемента к элементу. Рассмотрим, какие изменения активности в гидрогенолизе наблюдаются при переходе от одного металла к другому в данном периоде.

Мы измеряли каталитическую активность металлов трех периодов. Особенно тщательно были исследованы металлы подгруппы VIIA, VIII группы и подгруппы IB. В VIII группе можно выделить три подгруппы, обозначенные нами VIII₁, VIII₂, VIII₃, поэтому в каждое из семейств переходных элементов, которые мы изучали, попадают три металла VIII группы. Наиболее подробные данные по активности металлов в гидрогенолизе мы получили для третьего семейства переходных элементов (Os, Ir, Pt). В ряду этих металлов наиболее активным оказался осмий, который принадлежит подгруппе VIII₁. Платина, относящаяся к подгруппе VIII₃, по своей активности приблизительно на восемь порядков уступает осмию, а иридий, элемент подгруппы VIII₂, занимает промежуточное положение между осмием и платиной. Мы не располагаем точными данными по активности золота, металла подгруппы IB, расположенного вслед за платиной. Однако хорошо известно, что в реакциях гидрогенолиза углеводородов золото значительно менее активно, чем платина.

При исследовании второго семейства переходных элементов мы обнаружили, что и здесь активность падает при переходе от рутения к палладию (металлы VIII группы) и далее к серебру (металлу подгруппы IB). У переходных металлов первого семейства закономерности изменения активности были несколько иными. Так, мы выяснили, что активность никеля, открывающего подгруппу VIII₃, значительно выше, чем у железа, принадлежащего подгруппе VIII₁. Однако активность меди (металла подгруппы IB, который следует за никелем) оказалась намного ниже, чем никеля. Это свойство согласуется с характером изменения активности в двух других семействах.

Такая последовательность изменения качественно становится понятной на основе представлений, согласно которым каталитическая активность зависит, с одной стороны, от того, насколько легко реагирующая молекула образует связь с катализатором (т.е. от хемосорбции), а с другой — от прочности этой связи. Наиболее благоприятные возможности для развития максимальной активности катализатора создаются в том случае, когда реагирующая молекула адсорбируется быстро, но взаимодействует с поверхностью не очень сильно. Если же при хемосорбции возникают очень прочные связи, то адсорбированная



VIIA	VIII			IB
ПЕРВОЕ СЕМЕЙСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ				
Mn	Fe	Co	Ni	Cu
ВТОРОЕ СЕМЕЙСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ				
Tc	Ru	Rh	Pd	Ag
ТРЕТЬЕ СЕМЕЙСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ				
Re	Os	Ir	Pt	Au

СПЕЦИФИКА КАТАЛИТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ различных металлических катализаторов отчетливо проявляется в гидрогенолизе этана до метана. Каждый график на рисунке отвечает одному из семейств переходных элементов (слева). На горизонтальной оси показано положение элемента в периодической системе, на вертикальной — значения относительной активности металлов. Согласно этим данным, активность металлов подгруппы IB (меди и серебра) на много порядков ниже активности металлов VIII группы, таких, как никель, рутений, родий, иридий и осмий.

молекула скорее всего не сможет вступить в реакцию, а если реакция и произойдет, то образовавшийся продукт окажется неспособным быстро десорбироваться с поверхности. Металлы, для которых характерно такое поведение при адсорбции, располагаются в подгруппах VIA и VIIA, т.е. непосредственно перед металлами VIII группы. Среди типичных примеров — марганец, хром и вольфрам.

Образование слишком слабых связей адсорбированных молекул с поверхностью катализатора также препятствует протеканию каталитических реакций. Образование именно таких связей наблюдается у всех металлов подгруппы IB (медь, серебро и золото), что резко снижает их каталитическую активность. Хемосорбция на этих металлах также идет сли-

шком медленно. Уникальные каталитические свойства металлов VIII группы объясняются тем, что эти металлы быстро адсорбируют реагирующие молекулы и способствуют протеканию каталитического процесса.

ЗАВЕРШИВ работу по изучению гидрогенолиза этана на металлах, мы приступили к исследованию селективности биметаллических катализаторов. С этой целью мы начали измерять активность в гидрогенолизе биметаллических катализаторов, в состав которых входили высокоактивный металл VIII группы и неактивный металл подгруппы IB. Следовало выяснить, зависит ли действие такой неактивной в гидрогенолизе добавки от типа исследуемой каталитической реакции. Для этого активность биметаллических катализаторов мы про-

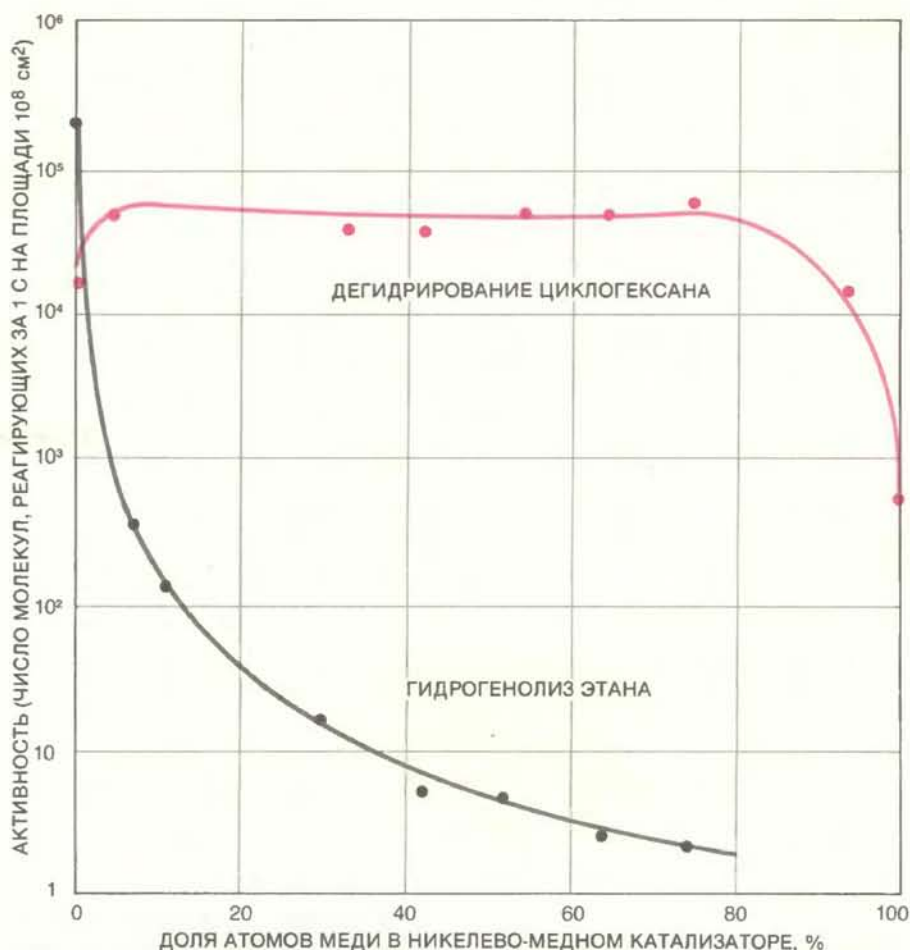
веряли не только в гидрогенолизе, но и в дегидрировании углеводородов. В отличие от гидрогенолиза превращение углеводородов в этой реакции протекает путем разрыва связей углерод—водород и отрыва атомов водорода, что приводит к образованию новых углеводородов. Мы, в частности, проводили дегидрирование циклогексана (C_6H_{12}), в ходе которого из одной молекулы циклогексана образуются одна молекула бензола (C_6H_6) и три молекулы водорода.

Первой биметаллической системой, которую мы исследовали, был сплав никеля и меди. Мы приготовили ряд сплавов различного состава и определили их каталитическую активность при $316^\circ C$. В отличие от катализаторов кластерного типа эти сплавы не относятся к материалам с большой площадью поверхности. Это порошкообразные металлы, у которых на поверхности находится только один атом из тысячи.

Прежде чем остановиться на результатах измерения активности никелево-медных сплавов в реакциях гидрогенолиза и дегидрирования, напомним, что химический состав поверхности никелево-медного сплава отличается от состава основной массы сплава. Поверхность сильно обогащена медью; даже если доля меди в сплаве значительно меньше доли никеля, на поверхности медь обнаруживается в больших концентрациях, чем никель.

В реакции гидрогенолиза этана влияние меди на каталитические свойства никеля оказывается существенно иным по сравнению с реакцией дегидрирования циклогексана. Так, изучая гидрогенолиз этана, мы убедились, что добавка всего 5% меди снижает активность никеля в тысячу раз. По мере дальнейшего увеличения содержания меди активность никелево-медного сплава продолжала уменьшаться. При исследовании тех же катализаторов в реакции дегидрирования циклогексана оказалось, что при добавке меди их каталитическая активность меняется очень мало. Она даже слегка увеличивалась при добавлении небольших количеств меди к никелю, и заметное падение активности наблюдалось только на образцах, содержащих совсем мало никеля.

Другой интересный пример изменения селективности был обнаружен при исследовании рутениево-медных катализаторов. На чистом рутении циклогексан дегидрируется до бензола и, кроме того, подвергается сильному гидрогенолизу с образованием небольших по размеру молекул алканов типа метана. При добавлении меди активность рутения в гидрогенолизе подавляется и протекает только реакция дегидрирования. В результате



БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КАТАЛИЗАТОРЫ с различным отношением содержания никеля (металла VIII группы) и меди (металла подгруппы IB) по-разному влияют на скорости дегидрирования и гидрогенолиза. (По сравнению с никелем медь мало активна в каждой из этих реакций.) По горизонтальной оси отложено относительное содержание меди в катализаторе, по вертикальной — активность катализатора. В дегидрировании циклогексана (цветная кривая) активность катализаторов, содержащих меньше 80% меди, мало зависит от химического состава. Напротив, в гидрогенолизе этана (серая кривая) активность резко снижается при добавлении даже небольшого количества меди. Из этих данных следует, что в присутствии металлов подгруппы IB активность металлов VIII группы в гидрогенолизе подавляется, а активность в дегидрировании меняется незначительно. Таким образом, сводя к минимуму влияние конкурирующей с дегидрированием реакции гидрогенолиза, можно резко увеличить селективность дегидрирования.

превращение циклогексана в бензол протекает значительно более селективно. При исследовании рутениево-медного катализатора выяснилась одна интересная особенность его структуры; атомы меди и рутения по-разному распределены в объеме катализатора: медь концентрируется на поверхности кристаллов рутения, так что на границе раздела образуются связи между атомами рутения и меди.

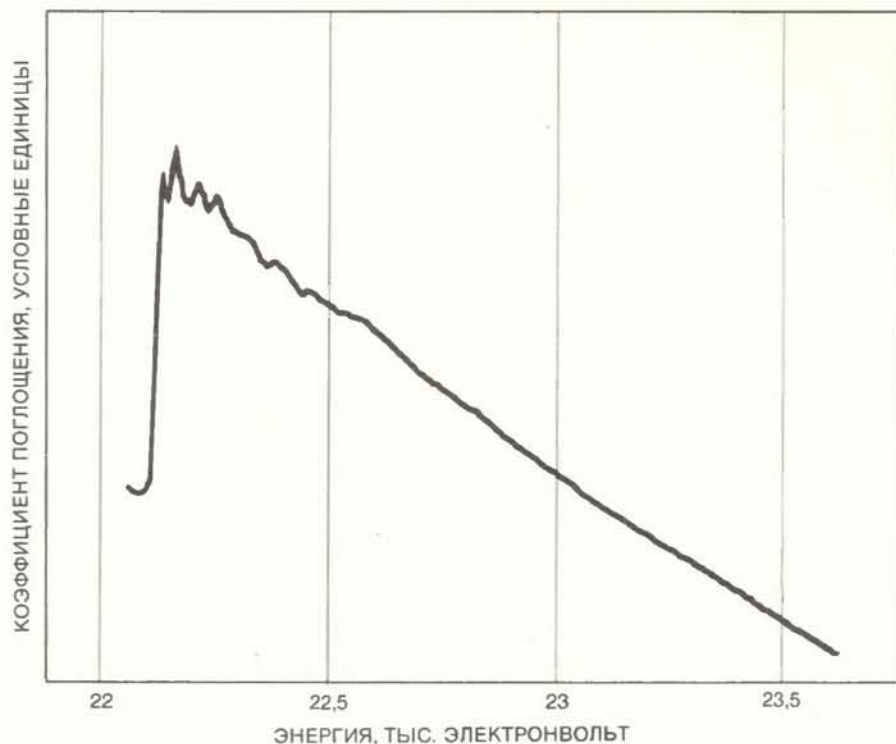
Следовательно, медь может влиять на селективность каталитического действия металлов VIII группы независимо от того, «смешивается» она с этими металлами или нет. Мы показали также, что активность в гидрогенолизе металлов VIII группы можно избирательно подавить добавками золота или серебра. Обобщая полученные нами результаты, можно прийти к выводу, что металлы подгруппы IV подавляют активность металлов VIII группы в гидрогенолизе и улучшают селективность этих катализаторов в таких реакциях превращения углеводородов, как дегидрирование и изомеризация. Эти выводы подтвердила и группа исследователей из Нидерландов.

МЫ С КОЛЛЕГАМИ добились значительных успехов в изучении способов приготовления и исследования свойств биметаллических кластеров. На первом этапе мы попытались получить очень небольшие кристаллы сплавов. Заметим, что применять термин «сплав» для обозначения всех биметаллических катализаторов не совсем правильно, поскольку отдельные пары металлических компонентов, хотя и не смешивающиеся между собой, могут быть очень активными в катализе. Лучше называть эти катализаторы биметаллическими агрегатами. Разработав методы диспергирования биметаллических агрегатов на носителях, мы создали новый вид катализаторов — биметаллические кластеры. Как правило, размер кластеров колеблется от 10 до 50 Å. В ряде случаев эти кластеры настолько малы, что буквально каждый их атом находится на поверхности.

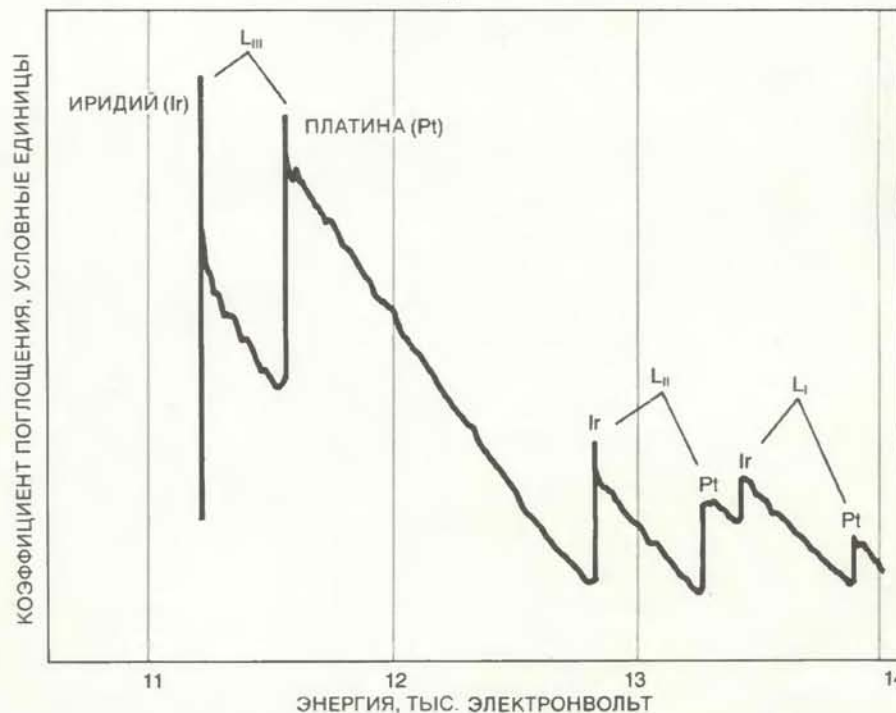
Вначале были синтезированы рутениево-медные кластеры. Для этого мы пропитывали кремнезем водным раствором, содержащим рутениевые и медные соли, а затем высушивали полученную массу и обрабатывали ее водородом при температуре 400—600°C. Такой способ дал возможность наносить рутениево-медные кластеры на поверхность кремнезема.

Приступая к работе в начале 60-х годов, мы хотели убедиться в том, что получили настоящие биметаллические рутениево-медные кластеры, а

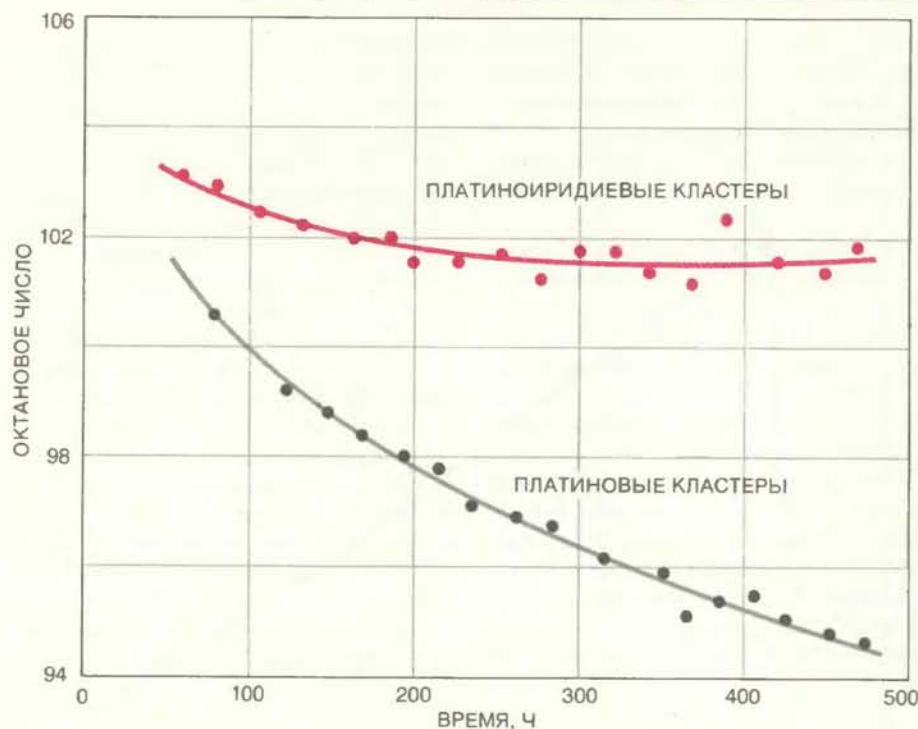
РУТЕНИЕВО-МЕДНЫЕ КЛАСТЕРЫ



ПЛАТИНОИРИДИЕВЫЕ КЛАСТЕРЫ



РЕНТГЕНОВСКАЯ АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ — эффективный метод исследования катализаторов кластерного типа. На изучаемый образец направляют рентгеновское излучение. Если энергия излучения достаточна для того, чтобы выбить электрон из атома, наблюдается резкое поглощение рентгеновских лучей. Пороговая величина энергии называется краем поглощения и характеризует тот или иной элемент. При облучении рутениево-медных кластеров (вверху) край поглощения наблюдается, если энергия излучения превышает 22 000 эВ. Обычно в спектрах наблюдаются несколько краев поглощения. В спектре, полученном для платиноиридиевых кластеров (внизу), имеются шесть краев поглощения в области 11 000—14 000 эВ. В области энергий, превышающих энергию края поглощения, коэффициент поглощения флуктуирует. Анализ этих флуктуаций в спектрах рутениево-медных кластеров доказывает реальность образования биметаллических кластеров, которые отличаются от монометаллических кластеров индивидуальных элементов. При исследовании флуктуаций в спектрах платиноиридиевых кластеров в так называемой L-области (например, в области L_{III}) было обнаружено, что эти кластеры не являются однородной смесью атомов платины и иридия.



ПЛАТИНОИРИДИЕВЫЕ КЛАСТЕРЫ более эффективны, чем чисто платиновые, для получения высокооктановых компонентов бензина. После эксплуатации в течение нескольких сотен часов на платиноиридиевых катализаторах (цветная кривая) получаются продукты с более высокими октановыми числами, чем на платиновых катализаторах (серая кривая). Кроме того, эффективность платиновых катализаторов со временем падает. Сравнение катализаторов проводилось при температуре 487°C и давлении 14,6 атм.

не смесь индивидуальных монометаллических кластеров рутения и меди. К сожалению, в то время физические методы исследований подобных систем были еще недостаточно совершенны и с их помощью нельзя было доказать, что на поверхности катализаторов присутствуют настоящие биметаллические кластеры. Для того чтобы подтвердить наше предположение о том, что оба металлических компонента катализаторов взаимодействуют между собой, мы воспользовались своим опытом, накопленным при работе с биметаллическими катализаторами без носителей. Исключительно чувствительным химическим тестом на присутствие кластеров оказалась реакция гидронолиза этана до метана, поскольку добавка металлов подгруппы IV к металлу VIII группы подавляет каталитическую активность последнего в гидронолизе. Если, несмотря на такую добавку, гидронолиз все же происходит, это может означать, что оба металла действуют отдельно и биметаллических кластеров не образуют. Проведя соответствующие измерения, мы показали, что между собой взаимодействуют не только рутений и медь, но и другие металлы VIII группы и подгруппы IV.

Сравнительно недавно исследователи стали использовать мощный фи-

зический метод, позволяющий анализировать структуру биметаллических кластеров, — рентгеновскую абсорбционную спектроскопию. Этот метод дополнил наши представления, полученные с помощью традиционных химических подходов. Суть его заключается в том, что если на образец исследуемого материала падает поток рентгеновских лучей, то степень их поглощения зависит от толщины образца и энергии рентгеновского излучения. Поглощение обусловлено передачей энергии электрону в атоме-поглотителе, переходящему при этом с низкого энергетического уровня на более высокий. Если энергия излучения достаточно велика, электрон может быть выбит из атома (в этом случае он называется фотоэлектроном). При такой энергии излучения происходит резкое увеличение поглощения и на энергетической диаграмме появляется «край» поглощения. Если энергия излучения превышает энергию отрыва электрона, то избыточная энергия переходит в кинетическую энергию фотоэлектронов.

Дальнейшее увеличение энергии излучения приводит к увеличению кинетической энергии электронов и уменьшению поглощения рентгеновского излучения. Это уменьшение будет наблюдаться до тех пор, пока энергия рентгеновских лучей не достигнет та-

кого значения, при котором станет возможным выбивание электронов из следующего, более низкого энергетического уровня атомов исследуемого вещества. При такой величине энергии на энергетической диаграмме будет наблюдаться еще один край поглощения. Затем с возрастанием энергии излучения поглощение вновь начнет уменьшаться.

Плавное уменьшение поглощения при увеличении энергии выше величины края поглощения может быть только в идеальной модели. В реальных спектрах поглощения из-за различных эффектов рассеяния фотоэлектронов наблюдаются флуктуации. Их анализ, так называемый анализ протяженной тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения, стал источником дополнительной информации о катализаторах: он позволяет рассчитать расстояние между атомами, образующими кластеры, а также определить число других атомов, расположенных в непосредственной близости от атома-поглотителя.

ПОСКОЛЬКУ применение рентгеновской абсорбционной спектроскопии для изучения биметаллических катализаторов обещало дать важные результаты, в начале 70-х годов мы начали проводить такие систематические совместные работы с Г. Виа и Ф. Лайтлом. В ходе экспериментов, проведенных в Станфордской лаборатории синхротронного излучения, мы доказали, что в рутениево-медных и осмиево-медных низкопроцентных катализаторах, нанесенных на кремнезем, обе пары металлов находятся в виде соответствующих биметаллических кластеров. При анализе тонкой структуры вблизи краев поглощения меди, рутения или осмия мы обнаружили, что многие атомы меди связаны не только с другими атомами меди, но образуют связи с атомами рутения или осмия. В то же время рутений и осмий имеют среди соседей очень мало атомов меди и большей частью окружены «своими» атомами. Так, с помощью физического метода подтвердилось предположение о структуре кластера, сделанное нами на основании измерения каталитической активности: сердцевина кластера состоит из атомов рутения или осмия, а на внешней поверхности находятся в основном атомы меди.

Весьма плодотворным было применение абсорбционной рентгеновской спектроскопии и для исследования платиноиридиевых кластеров. Мы обратились к этим катализаторам, рассчитывая заменить ими чисто платиновые кластеры, которые содержатся в промышленных катали-

заторах, используемых при производстве компонентов высокооктанового бензина.

Анализ протяженной тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения показал, что платиноиридиевые кластеры не однородны по составу. Этому факту можно дать два объяснения: либо отношение концентраций платины и иридия меняется от одного кластера к другому, либо даже у одного кластера некоторые участки обогащены платиной, а некоторые — иридием. Последнее допущение хорошо согласуется с данными по поверхностной энергии этих компонентов. Поверхностная энергия у иридия больше, поэтому мы сделали предположение, что на поверхности кластеров должны находиться участки, обогащенные платиной. Если это так, то основная масса иридия должна быть сосредоточена в самой сердцевине кластера, а по мере удаления к поверхности кластер должен обедняться иридием и обогащаться платиной.

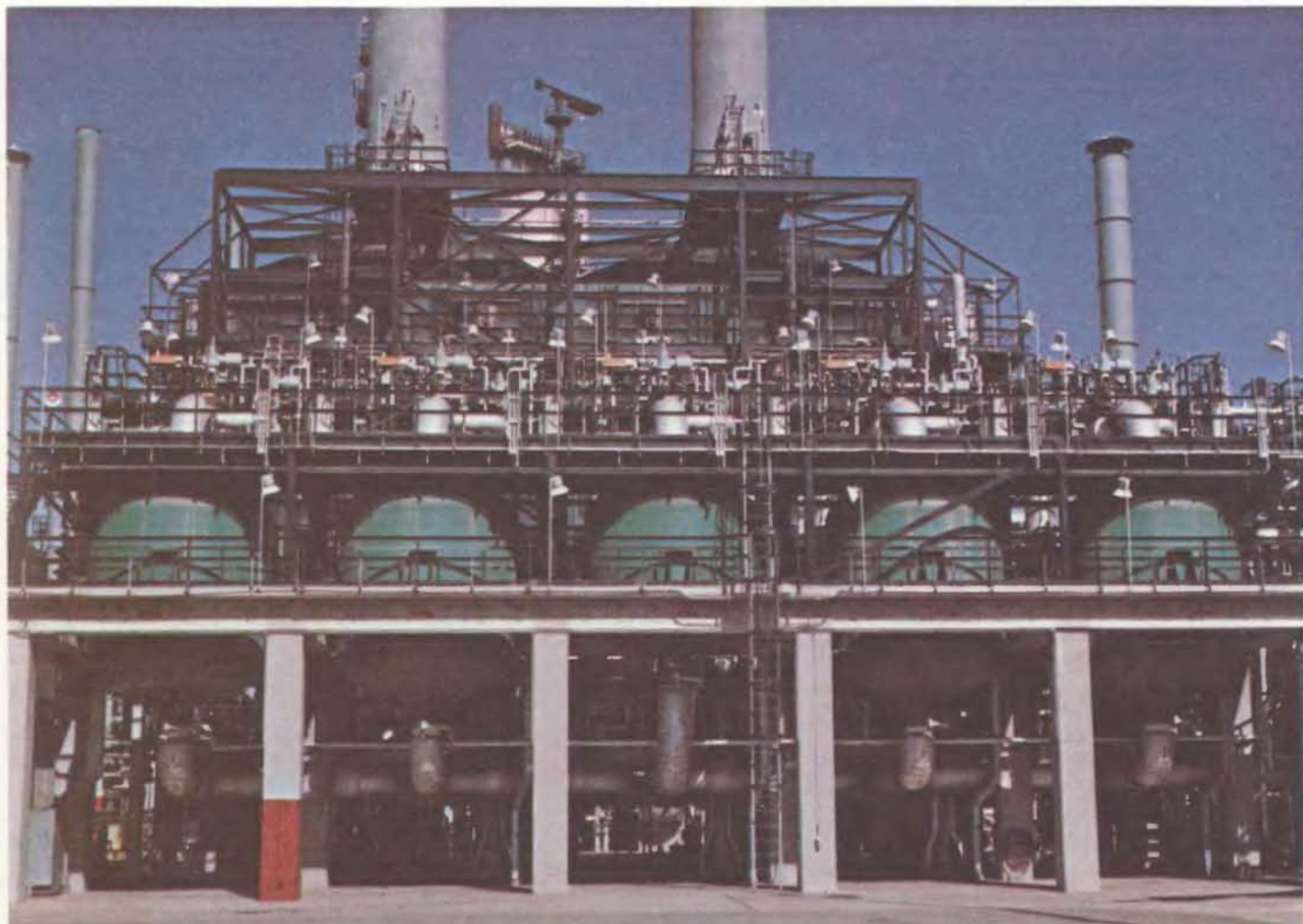
Из теоретического вывода о том, что платина концентрируется в при-

поверхностных участках платиноиридиевых кластеров, следует, что при уменьшении размера кластеров и соответственно увеличении доли поверхностных атомов платина и иридий должны образовывать самостоятельные фазы. Так, если в кластере доля поверхностных атомов равна $1/2$, причем платина и иридий находятся в кластере в равных пропорциях, то вся платина может находиться на поверхности, а весь иридий — внутри кластера. Если это соотношение равно 1, то полное разделение атомов платины и иридия невозможно для сферических частиц, но допустимо для частиц, имеющих форму двумерных «островков». Внутренняя часть такого островка должна состоять практически из чистого иридия, а внешняя — из атомов платины.

ЗАМЕНА чисто платиновых кластеров на платиноиридиевые позволяет улучшить эксплуатационные качества катализаторов нефтепереработки. Известно, что для получения

углеводородов с улучшенными октановыми характеристиками проводят так называемый риформинг. Однако используемые при этом платиновые катализаторы через определенное время дезактивируются, так как на поверхности платиновых кластеров откладываются углеродистые частицы, или «кокс», которые представляют собой побочные продукты высокотемпературных реакций, протекающих при переработке нефтяного сырья. В то же время поверхность платиноиридиевых кластеров закоксуывается значительно медленнее. Возможно, это происходит из-за того, что в присутствии иридия легче протекает гидрогенолиз продуктов коксообразования или их предшественников, поэтому тормозится их накопление на поверхности кластеров.

Вместе с тем очень высокая активность в гидрогенолизе также нежелательна, так как при этом увеличивается скорость превращения углеводородов в легкие газообразные продукты. На чисто иридиевых катализаторах образуется слишком много этих про-



ПЯТЬ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ на нефтеперерабатывающем заводе компании Imperial Oil, Ltd. в Стрэтконе (Канада) используются для получения высокооктановых компонентов бензина. Реакторы (окрашены в зеленый цвет) заполнены гранулами, содержащими платиноиридиевые кластеры. Пары нефтяной фракции подаются на пер-

вый реактор. На выходе из реактора пары вновь подогревают, подают на второй реактор и т.д. Окончательный продукт обогащен высокооктановыми компонентами бензина. Видны дымовые трубы печей, используемых для подогрева паров нефтяного сырья.

дуктов, ценность которых невелика. Добавление платины к иридию снижает выход газа, потому что платина, взаимодействуя с иридием, ослабляет его активность в гидрогенолизе. Современные промышленные установки риформинга работают при температурах около 500°C и давлениях порядка 15—30 атм. В таких условиях использование платиноиридиевых катализаторов увеличивает в равной степени выход ценных компонентов бензина и легких газообразных углеводородов. Подобный состав продуктов приемлем для практики, тем более что скорость превращения углеводородов на наших катализаторах достаточно велика.

После успешного внедрения в 1971 г. платиноиридиевый катализатор стал применяться во многих установках риформинга компании Еххон в разных странах. На первых этапах этих разработок большую помощь нам оказали Дж. Картер и А. Барнет. Впоследствии другие исследователи из компании Еххон внесли свой вклад в промышленное внедрение разработок не только на установках этой компании, но и в других фирмах по нашим лицензиям.

Успешной оказалась попытка применить наши катализаторы в комбинации с другим катализатором риформинга. Речь идет о платинорениевом катализаторе на оксиде алюминия, разработанном в Shevron Corporation. Платинорениевая система отличается от биметаллических систем, рассмотренных в данной статье, поскольку рений относится к металлам подгруппы VIIA. Платинорениевые катализаторы особенно эффективны при селективном превращении циклоалканов (насыщенных циклических углеводородов) в ароматические (ненасыщенные циклические) углеводороды, тогда как платиноиридиевые катализаторы очень активны в реакциях превращения нециклических алканов в ароматические соединения. Напомним, что кольцо ненасыщенных углеводородов содержит меньше водорода, чем кольцо насыщенных соединений.

Поскольку образование ароматических соединений из циклоалканов протекает быстрее, чем из нециклических алканов, риформинг обычно проводят раздельно в две ступени. На первой ступени происходит ароматизация циклоалканов, а на второй — ароматизации подвергаются в основном нециклические алканы. Соответственно в реакторах первой ступени можно использовать платинорениевый катализатор, а в реакторах второй ступени — платиноиридиевый. В промышленности установки риформинга состоят из нескольких последо-

вательно соединенных реакторов. Головные реакторы можно загружать платинорениевым катализатором, а хвостовые — платиноиридиевым.

Когда на нефтеперерабатывающих установках в один и тот же реактор загрузили комбинированный катализатор, то оказалось, что всю операцию риформинга можно проводить не в две, а в одну стадию и что при этом сохраняются лучшие качества обоих катализаторов. Сейчас уже построено много установок, предназначенных для работы с комбинированными каталитическими системами.

Следует отметить, что выбор той или иной каталитической системы определяется с учетом многих факторов. Наиболее существенные среди них — активность данной системы и выход целевых продуктов. Относительное значение разных факторов и, следовательно, экономические соображения зависят от конкретного процесса, в котором должны использоваться катализаторы.

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ катализаторы нашли широкое применение в нефтяной промышленности. В настоящее время они весьма эффективно используются при переработке нефтяного сырья в самых различных уголках земного шара. Но это не значит, что исследования биметаллических катализаторов можно завершить. Несмотря на то что работа по их созданию уже принесла значительный эффект в процессе риформинга, вполне возможно, что дальнейшее усовершенствование катализаторов улучшит показатели этого процесса. Кроме того, есть все основания считать, что путем комбинации между собой различных металлов удастся создать новые катализаторы не только для риформинга, но и для других промышленно важных процессов. В частности, увеличивая число металлических компонентов и создавая полиметаллические кластеры, можно, по видимому, резко расширить сферу применения каталитических систем.

Наука и общество

Скрытая улика

ОКОЛО 300 млн. лет назад Северная Америка столкнулась с Африкой. При этом образовались Аппалачи и закрылся древний океан, известный среди геологов как Япетус. Спустя примерно 110 млн. лет континенты вновь разъединились и между ними раскрылся новый Атлантический океан. Континенты раскололись приблизительно по той же линии, по которой соединились. За одним исключением, часть Африки осталась присоединенной к Северной Америке. Теперь эта часть называется Флоридой. В настоящее время обнаружен шов между Северной Америкой и этим фрагментом африканской коры. Он расположен глубоко под южной частью шт. Джорджия.

Первое непосредственное проследование глубокой шовной зоны было произведено Консорциумом континентального профилирования методом отраженных волн (COCORP) при Корнеллском университете. Работы на территории Джорджии велись К. Нельсоном из этого университета. COCORP использует методику «Вибросейс», разработанную фирмой Continental Oil Company для поисков нефти. При этом требуется пять вибраторов, каждый из которых смонтирован на грузовике, около 2000 небольших сейсмографов, установленных вдоль базовой линии длиной

10 км, и еще один грузовик, на котором устанавливается регистрирующая аппаратура и устройство, задающее режим работы вибраторов. 20-секундные синхронные колебания создают сейсмический сигнал. Картина отражения, получающаяся в результате применения этого метода, обусловлена разделениями, расположенными на глубине.

Предположения о происхождении Флориды вначале основывались на совершенно иных данных. В 1966 г. Дж. Вильсон из Торонтского университета изучил образцы пород, извлеченных из буровых скважин, пройденных на прибрежной равнине северной Флориды. Эти породы слагают погребенную структуру, которую полевые геологи называют бассейном Суwonни. Содержащиеся в них ископаемые аналогичны ископаемым из пород Западной Африки, имеющих такой же возраст (500 млн. лет), но отличаются от ископаемых из пород этого же возраста, распространенных в Аппалачах. Бассейн Суwonни выявляется на профилях COCORP; он подстилает прибрежную равнину, которую сформировали сильно отражающие осадки, сравнительно недавно (в геологическом масштабе) отложившиеся в Атлантическом океане. На территории Джорджии сейсмические профили выявили еще одну погребенную структуру, сложенную толщей осадочных и вулканических пород.

Это неразвившийся (океанический) бассейн; здесь кора растягивалась и утонялась, но тем не менее сопротивлялась проникновению вулканических пород, что препятствовало формированию океанского дна. Полевые геологи, которым эта структура известна по образцам из скважин, называют ее бассейном Южная Джорджия.

Шов между Северной Америкой и Африкой, видимо, проходит непосредственно к северо-западу от бассейна. На профилях COCORP он выявляется в виде широкой сложнопостроенной зоны, характеризующейся слабым отражением сейсмических волн. То, что эта зона действительно представляет собой шов, подтверждается рядом фактов. Она расположена между породами африканского основания (подстилающими бассейн Суванни) и породами североамериканского основания (западная часть центральной Джорджии). Те и другие метаморфизованы и имеют более древний возраст, чем Атлантика и Япетус. Они были частью большого Африканско-Североамериканского массива суши, который раскололся, соединился и вновь раскололся. Радиологический возраст образцов этих пород, извлеченных из скважин, составляет 1,1 млрд. лет.

Далее, описываемая зона совпадает с крупной магнитной аномалией, выявленной в коре аэромагнитными методами. В частности, она совпадает с Брансуикской аномалией, протягивающейся в виде широтной полосы через Алабаму и Джорджию. Считалось, что эта полоса маркирует какого-то рода раскол коры. На продолжении Брансуикской аномалии в океане расположена граница между континентальной корой Северной Америки и океанической корой Ат-

лантики. Группа COCORP пришла к выводу, что к северу от этого места Атлантический океан раскрылся точно вдоль линии, по которой закрылся океан Япетус.

Совсем недавно группа COCORP получила сейсмические профили в юго-восточной Джорджии поперек Брансуикской аномалии. Они обнаружили несколько особенно сильно отражающих границ на глубине 18 км в пределах шовной зоны. Интенсивность отражения и линзообразная форма отражающих границ позволили предположить, что последние могут представлять собой поверхность раздела газ — жидкость, впервые обнаруженную глубоко в коре. Представляется, что флюиды скапливались в структуре, возникшей при соединении континентов по шву. Хотя о поведении флюидов, скопившихся в коре, известно мало, они должны играть решающую роль в процессах деформации коры.

Звукограмма

ГОЛОГРАММА — это трехмерное изображение, или интерференционная картина, создаваемая с помощью лазерных лучей. Как правило, голограмма записана на прозрачной фотопластинке и воспроизводится в лазерном свете или в обычном белом свете. Сотрудники Массачусетского технологического института разработали голографическое устройство, которое взаимодействует со звуковыми волнами.

В заметке, опубликованной в журнале «Applied Physics Letters», Д. Оутс, П. Готтшалк и П. Райт поясняют, как работает такое устройство. Рабочая среда представляет собой

пластину ниобата лития, легированного железом, длиной 1 см, шириной 1 см и толщиной 1 мм. Направляя на пластину лучи двух аргоновых лазеров, исследователи создавали в нем голографическую решетку. Такая решетка состоит из чередующихся параллельных плоскостей — областей света, где две волны, идущие от лазера, складываются благодаря интерференции, и областей тени, где в результате интерференции волны друг друга гасят. Атомы железа, оказавшиеся в освещенных областях (зоны высокой энергии), поглощают энергию и излучают электроны. Электроны медленно дрейфуют к темным областям (зоны низкой энергии), где они остаются даже после того, как лазер выключен. Перемещение электронов приводит к возникновению регулярных вариаций свойств пластины: например, плотность вещества в освещенных областях оказывается меньше плотности в областях тени.

Такие вариации плотности влияют на скорость звуковых волн. Звуковая волна, падающая на голограмму, создаваемую в пластине ниобата лития, может отразиться, если ее частота близка к величине, определяемой периодом решетки. Если на пластину падает сразу несколько волн различной частоты, то отразится лишь та волна, частота которой попадает в заданный узкий диапазон. Таким образом, голографическое устройство может служить акустическим фильтром.

Фильтры — важный компонент систем, применяемых на спутниках и в средствах связи. По мнению Оутса, голографическое устройство идеально приспособлено для подобных целей: оно простое, компактное и может производиться серийно.



Сильно отражающие границы (желтые) в шовной зоне, обнаруженной сейсмическим профилированием в юго-восточной Джорджии

Паук-скакун, который плетет ловчие сети

В отличие от других пауков-скакунов
австралийский паук *Portia fimbriata* плетет ловчие сети.

Обладая острым зрением, этот хитрый хищник
ловит других пауков и в сети,
и просто на земле или растительности

РОБЕРТ Р. ДЖЕКСОН

В ТРОПИЧЕСКИХ дождевых лесах Квинсленда в Австралии живет необычный паук *Portia fimbriata*. По типу поведения почти всех пауков можно отнести к той или другой из двух больших групп: к «оседлым», строящим ловчие сети (паутину, или тенёта), либо к подвижным охотникам. У пауков, плетущих сети (тенётных пауков), очень слабое зрение, и о том, что в сеть попала жертва (это главным образом насекомые), они узнают по вызываемой ею вибрации паутины. Подвижные пауки не плетут сетей, а охотятся на растительности и на земле. Особый интерес в этой второй группе вызывают пауки-скакуны, или сальтициды, не только из-за своей способности прыгать (за которую они и получили свое название), но и потому, что они обладают великолепно развитым зрением. У *Portia fimbriata* огромные, как у вампира, глаза, которые выдают принадлежность этого паука к семейству Salticidae. Но в отличие от типичных сальтицид он плетет ловчие сети.

Впервые я обратил внимание на *Portia*, когда искал пауков в обрывках паутины, свисающих с деревьев или приставших к камням, в квинслендском дождевом лесу. Дело было в 1979 г., и *Portia* уже был известен, но поведение его еще не изучалось. Я вытащил пальцем из сети что-то, что показалось мне рваным заплесневелым листочком, но тут же понял, что ошибся, когда «листочек» зашевелил педипальпами (так называются парные конечности пауков, примыкающие к ротовым частям), поднял голову (переднюю часть тела) и уставился на меня своими огромными глазами. Я сразу же догадался, что этот паук длиной примерно 1 см и есть *Portia*. Так было положено начало увлекшему меня направлению исследований, которое занимает меня до сих пор. Из нескольких сот экземпляров *Portia*, которых я наблюдал в природных условиях и в лаборато-

рии, почти все жили на сетях.

Наряду с этим у *Portia* обнаружилась другая очень интересная черта — он оказался в высшей степени универсальным хищником. Типичные представители семейства Salticidae охотятся за подвижными насекомыми. Шесть небольших боковых глаз паука-скакуна в совокупности обеспечивают поле зрения в 360°. Как только в обозримое пространство попадает движущийся объект, паук поворачивается в его сторону и с помощью пары главных глаз определяет, кто перед ним — свой, враг или потенциальная жертва. Когда паук-скакун опознает в объекте насекомое, он подкрадывается к нему и прыгает, вонзая ядовитые когтевидные членики хелицер в тело животного, и часто не вынимает их до тех пор, пока яд не подействует на жертву.

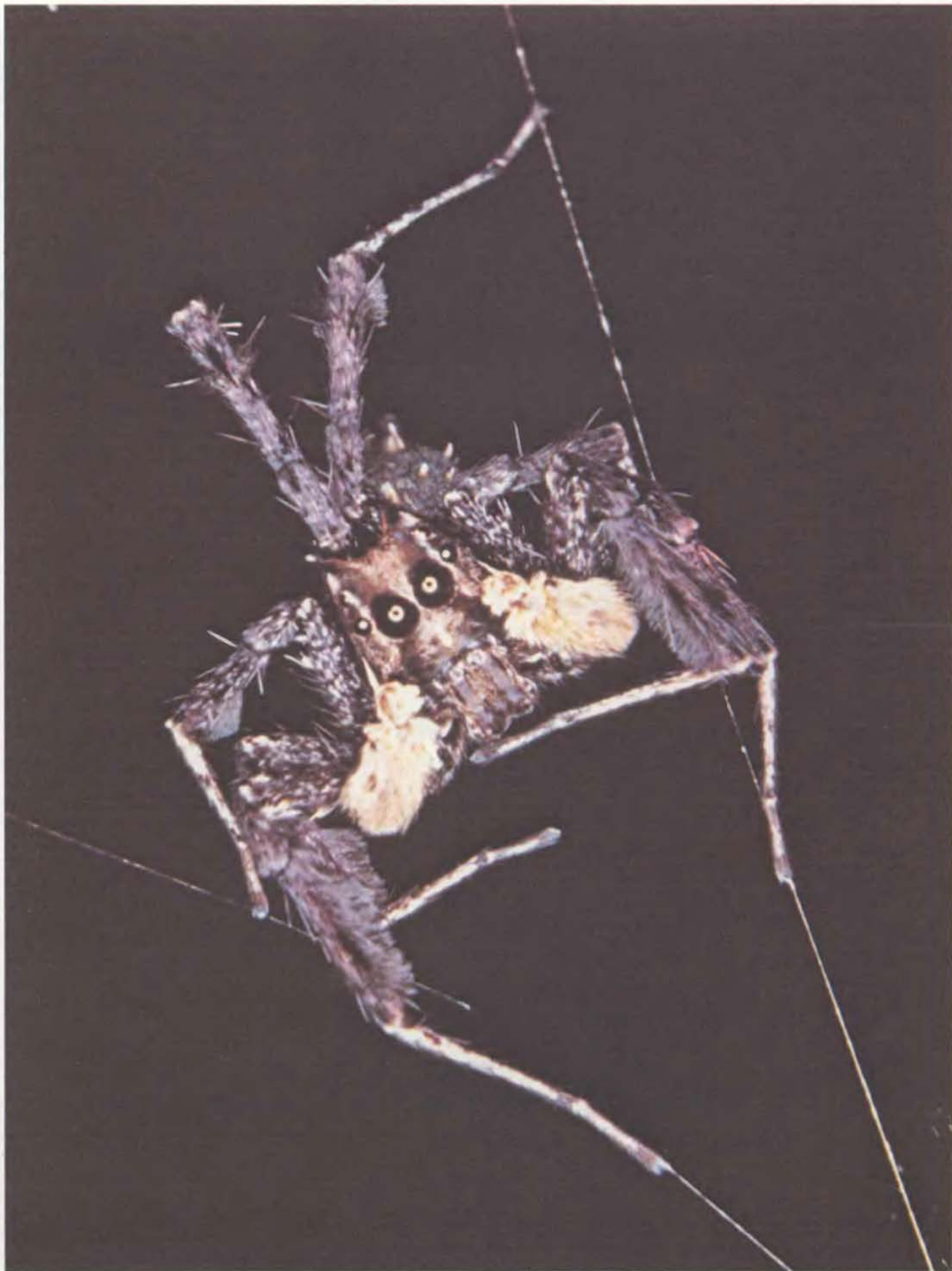
Зрение у *Portia* развито не хуже, чем у любого другого паука-скакуна, но он не принадлежит к числу специализированных охотников за насекомыми. Его главными жертвами являются другие пауки — как строящие сети, так и скакуны. Уже одно это отличает *Portia* от большинства пауков-скакунов, но еще интереснее разнообразие его поз и движений во время охоты. У *Portia* нет какой-то одной определенной стратегии охоты, как и следует ожидать от хищника, питающегося животными многих видов. (И среди других животных «мастера на все руки» обычно не имеют узкой специализации.) Напротив, этот паук владеет множеством различных охотничьих приемов, каждый из которых точно соответствует характеру жертвы. А естественность, с которой *Portia* охотится на ловчей сети, поистине удивительна для паука из семейства скакунов.

ПЕРВЫЙ вопрос, который мне хотелось выяснить, это — занимает ли *Portia* чужие сети или строит свои. Используя методику индивидуально-

го мечения и имея под наблюдением в дождевом лесу 59 особей *Portia*, помеченных пятнышком краски, мне удалось выяснить, что они делают и то и другое. Было странно наблюдать, что паук-скакун — и вдруг плетет сеть. А *Portia* справляется с этим очень ловко. Легко и безостановочно шагая по все увеличивающейся паутине, время от времени он вращает брюшком и выпускает новые шелковые нити. При этом паук держит задние ноги поднятыми, чтобы они не запутались в сети, пока новые нити прикрепляются к уже сотканной части паутины либо к камням и растительности. Даже вращательные движения, которые *Portia* делает чтобы захватывать ногами нити паутины, — это типичная черта поведения пауков, плетущих сети.

Плетением сетей у *Portia* занимаются самки и молодые самцы; взрослые самцы в этом не участвуют, их основная деятельность — спаривание. Подобно тенётным, т.е. строящим сети, паукам из других семейств, но в отличие от прочих видов сальтицид, помеченные мною особи *Portia* были четко выраженными оседлыми животными. Некоторые из них оставались в одной и той же сети на протяжении 48 дней, и за это время они несколько раз линяли, затем спаривались и откладывали яйца. Иногда взрослый или молодой самец жил в одной паутине с неполовозрелой самкой и спаривание пауков происходило после того, как оба партнера достигали половой зрелости.

Паутина *Portia* обычно состоит из трех наклонных полосок, соединяющихся у основания и расходящихся кверху. В трехмерное переплетение паутинных нитей, заполняющих образующуюся «чашу», обычно вставляются мертвые листья. Самка поднимает их в свою сеть, прикрепляя к листьям все новые и новые нити по мере того, как рвутся старые. Выбрав слегка вогнутый лист, она помещает



АВСТРАЛИЙСКИЙ ПАУК *Portia fimbriata* из семейства пауков-скакунов (Salticidae) строит ловчие сети, но в то же время активно охотится, руководствуясь в первую очередь зрением. У типичных тенётных пауков зрение слабое, а типичные пауки-скакуны не строят сетей. В дождевом ле-

су Квинсленда *Portia* плетет паутину в темных местах между деревьями и под выступами камней. Эта фотография сделана Д. Клайном в лабораторных условиях. Светлые круги на глазах — это не зрачки, а отражение света от фотовспышки. Длина паука примерно 1 см.

яйца в углубление и закрывает их паутиной. Затем самка довольно много времени «стоит» над яйцами, подогнув ноги под тело и прижав педипальпы к хелицерам (челюстям). В такой позе, называемой «криптической позой покоя», когда конечности не видны, *Portia* более всего похож на лист. Вероятно, это сходство скрывает его от хищников, пользующихся при охоте зрением, например, от птиц и ящериц.

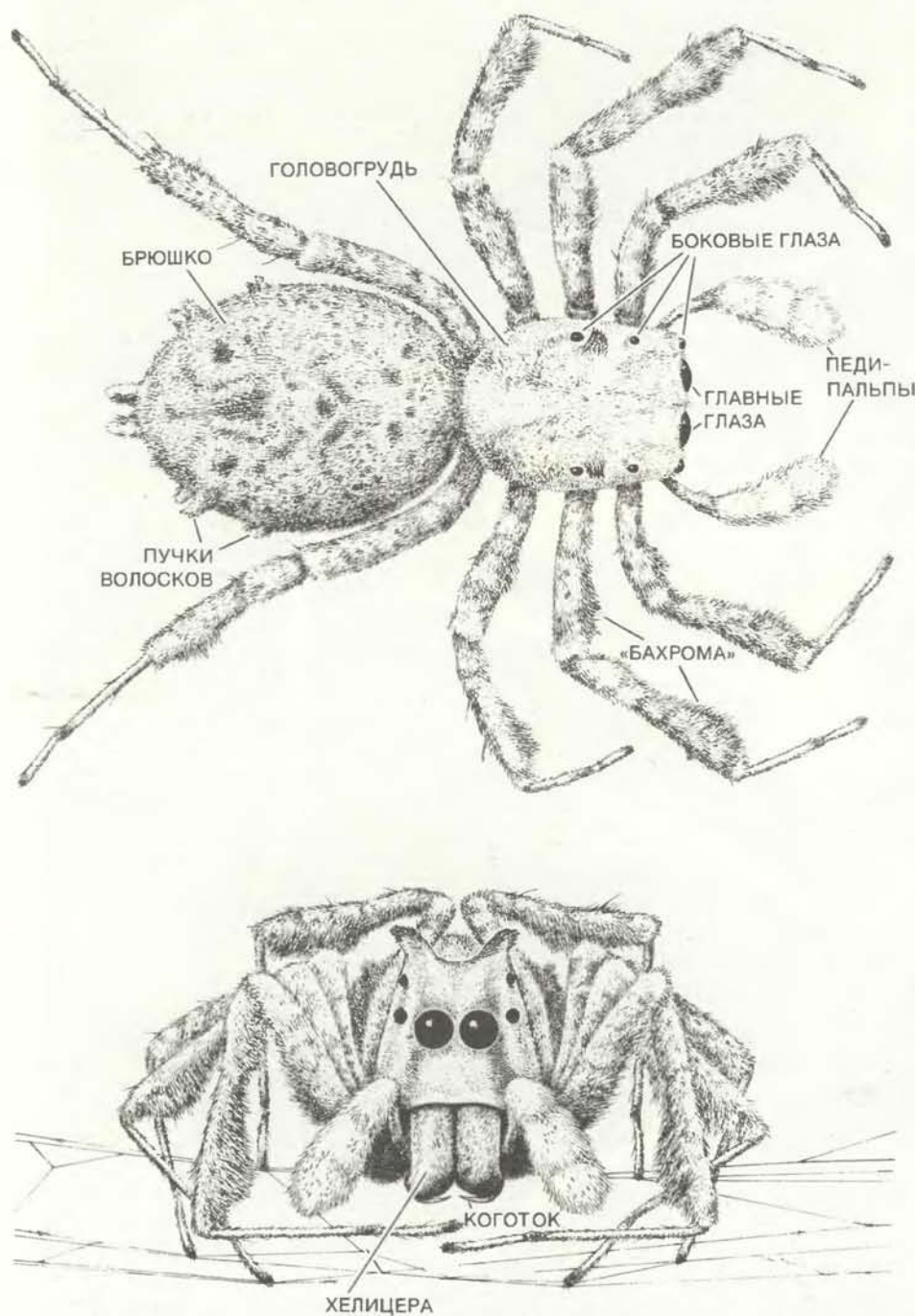
Но паутина служит *Portia* не только гнездом. В дождевом лесу он часто прикрепляет свои сети к сетям пауков других видов, иногда даже окружает своей сетью чужую сеть, создавая некую единую сложную конструкцию. В этом *Portia* не отличается от многих других видов тенетных пауков. Однако цель его иная — вторгнуться на чужую сеть и съесть ее хозяина. Когда *Portia* входит на чужую сеть, он вызывает ее вибрацию

специфическими движениями педипальп и ног. Паук-хозяин «попадает» на удочку» и реагирует на эту вибрацию так, как если бы она была вызвана представителем его вида или потенциальной жертвой (например, насекомым), а не хищником.

Анализ видеоманитофонной записи поведения *Portia* показал, что оно сводится к трем типам действий, вызывающих вибрацию, которые я обозначаю как дрожание, нанесение ударов и дергание. Ступив на чужую сеть, паук через некоторое время вытягивает вперед педипальпы или четыре передние ноги и, производя серию коротких вертикально направленных движений, приводит их в состояние «дрожки», передающейся паутине. В первые моменты своей «интервенции» паук может также ударить по паутине одновременно обеими педипальпами или одной, а иногда и двумя-тремя из четырех передних ног; в этом случае конечности медленно поднимаются вверх и назад и затем резко падают на паутину.

Несколько позже паук переходит на дергание. Оно может осуществляться различным образом — паук дергает паутину один или несколько раз подряд, стоит на месте либо передвигается и притом пускает в ход всевозможные сочетания из своих восьми ног. Он захватывает паутинную нить лапкой (последним члеником) педипальпы или ноги и дергает ею вверх или вниз. Амплитуда движения дергающей ноги может составлять от 1 до 7 мм. Глядя на хозяина сети, *Portia* часто кардинально меняет способ дергания, как бы подбирая наиболее удачные движения для привлечения своей жертвы. Если паук-хозяин начинает приближаться, *Portia* продолжает дергать сеть с помощью той же комбинации конечностей, двигая ими с примерно постоянной скоростью и амплитудой. Если же тот останавливается, *Portia* снова меняет способ вибрации сети.

В одних случаях хозяин сети постепенно заманивается к остающемуся на месте *Portia*, в других пришелец сам медленно подкрадывается по сети к добыче. Когда паук-жертва оказывается на расстоянии 5 мм (равном половине длины тела *Portia*), *Portia* поднимает четыре передних ноги вверх и назад и выпускает когтевидные концевые членики хелицер. Паук может оставаться в такой позе несколько секунд или даже минут. Наконец он совершает рывок вперед, хватая паука-жертву хелицерами или просто вонзает в него коготки. В последнем случае уколотый паук убегает, а хищник наблюдает за тем, что произойдет. Примерно через 15 с яд, введенный через коготки, начинает действовать и вызывает у жертвы



КРИПТИЧЕСКАЯ ПОЗА ПОКОЯ (внизу) позволяет *Portia* скрываться от врагов. Паук подгибает ноги и педипальпы и прижимает их к телу, так что его абрис становится неузнаваем. Когда *Portia* преследует других пауков-скакунов, он прячет педипальпы таким же образом — сгибает их и держит рядом с хелицерами (при обычном движении педипальпы вытянуты и направлены вперед). Бахрома из волосков на ногах и пучки волосков на брюшке делают паука похожим на лист. Обманутую жертву он хватает хелицерами и прокалывает ее их коготками, в которых находятся протоки желез, выделяющих ядовитый секрет.

конвульсии и паралич. Тогда *Portia* подбегает по сети и вступает в обладание своей добычей.

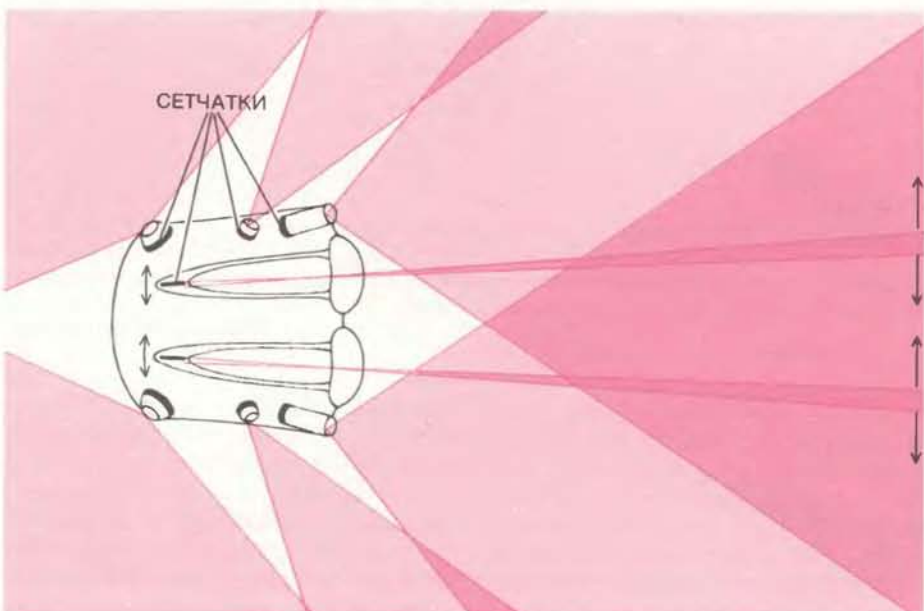
Два вида тенётных пауков из числа жертв *Portia* являются общественными пауками, которые объединяют свои ловчие сети. Их паутиный комплекс состоит из 10—100 сетей. Как-то я наблюдал, как *Portia* блуждал по такому комплексу сетей на протяжении нескольких дней, очевидно находя там богатую добычу. В лаборатории я видел, как *Portia* поедал не только самих общественных пауков, но и насекомых, запутавшихся в их липких ловчих сетях; иногда он даже выхватывал насекомое прямо из хелицер паука-хозяина. *Portia* может также питаться и яйцами хозяина: с помощью хелицер он проделывает отверстие в паутиной оболочке, покрывающей яйца, и обволакивает ее слюной. Поскольку яйца неподвижны, легкость, с которой *Portia* находит их, свидетельствует об остроте его зрения.

Другие виды пауков также, подобно *Portia*, захватывают чужие сети и используют при этом специфические методы. Например, М. Уайтхауз из Кентерберийского университета (Новая Зеландия) и я изучали представителей двух видов пауков-миметидов, которые ловят тенётных пауков, имитируя вибрацию сети попавшимся насекомым. Как показали Ф. Воллрат из Оксфордского университета и М. Уайтхауз, некоторые пауки рода *Argyrodes* специализируются на том, что похищают насекомых из сетей пауков других видов. С. Поллард из Кентерберийского университета изучал хищного паука *Clubiona cambridgei*, пожирающего яйца пауков. Создается, однако, впечатление, что по разнообразию способов охоты *Portia* не имеет себе равных. Более того, это касается не только возможностей вида в целом, но и способностей каждой отдельной особи.

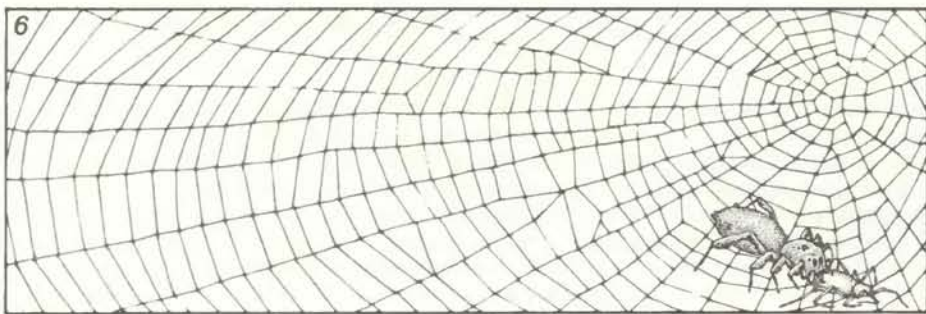
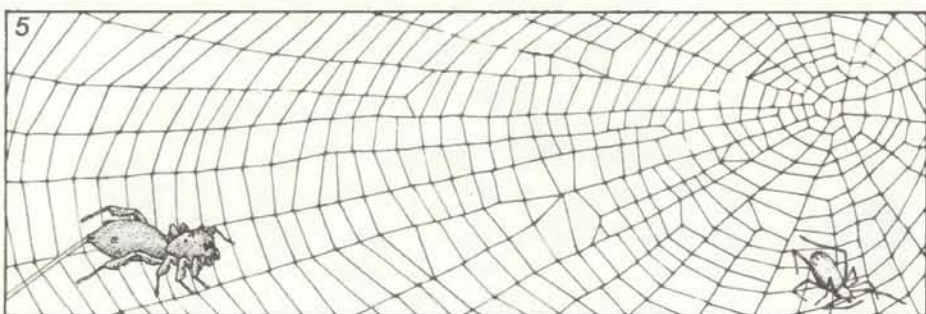
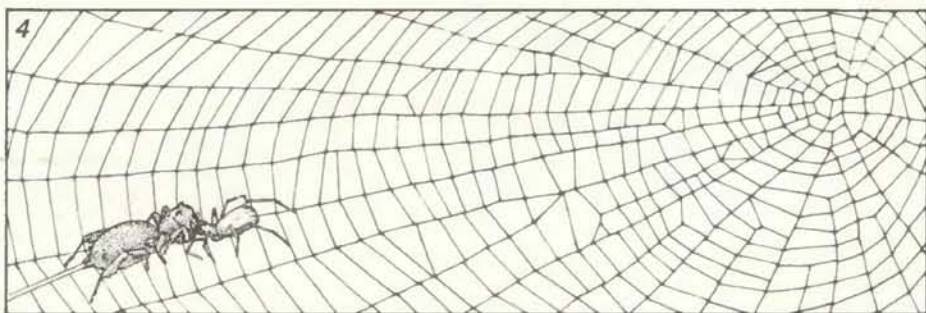
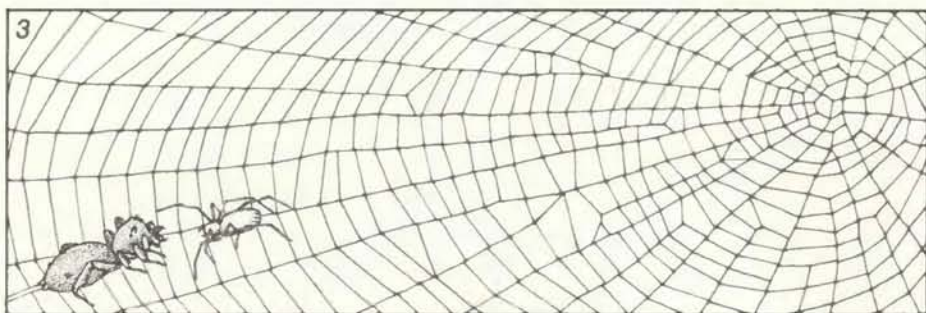
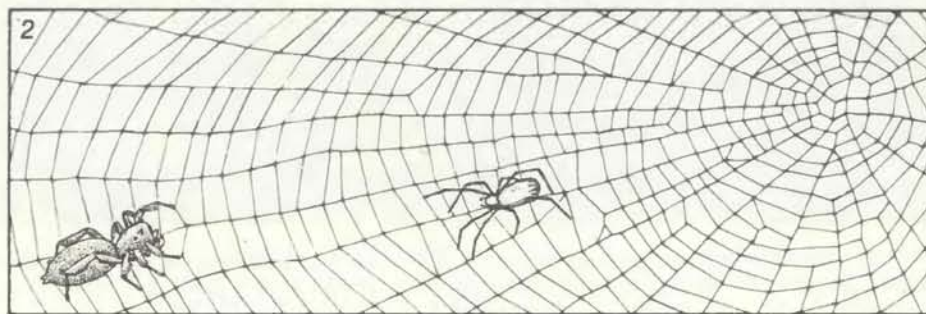
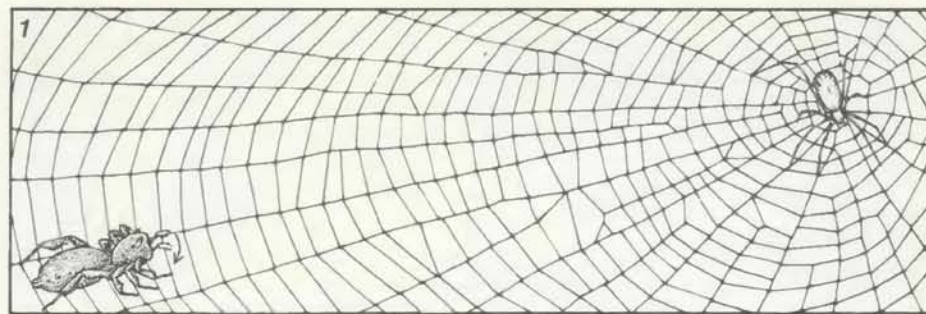
Для насекомых ловчие сети *Portia* не очень опасны. Мухи или другие насекомые если и прилипают случайно к его паутине, то лишь на несколько секунд, и паук обычно не обращает на них ни малейшего внимания. Однако, прикрепив свою сеть к комплексу паутины другого вида, *Portia*, по-видимому, может использовать попавших в сеть насекомых в качестве приманки. Насекомое пытается из нее выбраться и вызывает вибрацию, которая передается на соседний паутиный комплекс. В ответ на эти сигналы его обитатели устремляются на сеть *Portia* — увы, лишь затем, чтобы самим стать жертвами. Не покидая своего обиталища, *Portia* может таким способом обеспечить себя добычей в избытке, поскольку



ГЛАЗА *Portia* отчетливо видны на микрофотографии его головогруды, сделанной с помощью сканирующего электронного микроскопа. Латеральные глаза средней пары — крупные и нормально функционирующие, в то время как у других видов пауков-скакунов они дегенерировали и превратились в рудименты. Это свидетельствует об относительной эволюционной примитивности *Portia*.



БОЛЬШОЕ ПОЛЕ ЗРЕНИЯ обеспечивается шестью латеральными глазами (показано на схеме горизонтального среза через головогрудь *вверху*), а крупные подвижные главные глаза обеспечивают остроту зрения. На схеме вертикального среза через главный глаз (*внизу*) можно видеть систему линз, аналогичную фотокамере с телеобъективом: хрусталик представляет собой фокусирующую линзу, а впадина конусообразного тканевого образования, в которое погружена сетчатка, играет роль рассеивающей линзы. В результате достигается хорошее разрешение. Если бы не было впадины, возникающее на сетчатке изображение объекта охватывало бы меньшее число фоторецепторов и разрешение было бы низким (*пунктир*). Благодаря такому устройству зрительной системы *Portia* видит очень хорошо и может обнаружить добычу на расстоянии 30 см.



места, освобождающиеся в комплексе, быстро занимают другими пауками.

Когда же *Portia* покидает свою сеть для охоты, он редко нападает на насекомых. Во всяком случае, никому еще не удалось заметить, чтобы паук делал это в естественных условиях. В лабораторных условиях паук иногда преследует насекомое, стараясь оказаться на расстоянии нескольких миллиметров от него, чтобы прыгнуть и схватить. Однако он почти всегда терпит фиаско и редко продолжает преследование. По-видимому, в «меню» *Portia* насекомые фигурируют нечасто — только тогда, когда ему очень легко их поймать, и этим он сильно отличается от типичных представителей семейства Salticidae, которые питаются почти исключительно насекомыми. Активное преследование, завершающееся прыжком на добычу, столь свойственное другим паукам-скакунам, совсем отсутствует в поведении *Portia*. Большинство сальтицид перемещаются стремительно, даже если они не преследуют жертву, но *Portia* всегда движется медленно, тяжелыми шагами.

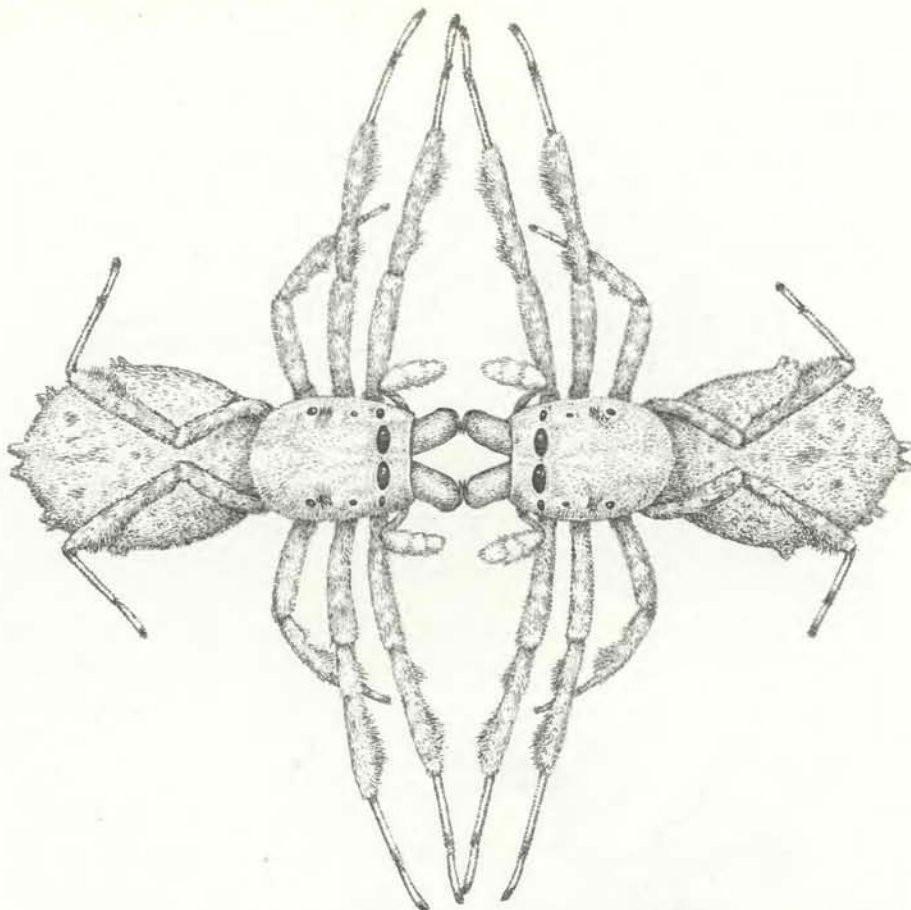
Такое медленное передвижение малоэффективно при охоте на насекомых, зато оно очень удобно для нападения на других пауков-скакунов, составляющих второй важный компонент пищи *Portia*. Неизвестен пока ни один другой вид пауков, который бы владел специальными методами охоты.

ВТОРЖЕНИЕ НА ЧУЖУЮ ПАУТИНУ и убийство ее хозяина — один из основных охотничьих приемов *Portia*. Специальными движениями педипальп и ног он вызывает вибрацию сети, заманивая таким образом паука-хозяина, который воспринимает эту вибрацию как исходящую от попавшего в сеть насекомого или же от представителя его собственного вида и соответственно реагирует. Ступив на чужую сеть, *Portia* сначала вызывает ее вибрацию дрожанием педипальп или передних ног (1); потом он начинает дергать паутинные нити, используя для этого различные комбинации всех конечностей (2). Когда хозяин сети приблизится к нему настолько, что окажется не дальше примерно 5 мм (3), *Portia* поднимает четыре передние ноги, выпускает коготки хелицер и одновременно укрепляет паутинную нить, чтобы она не оборвалась во время нападения. В этом положении хищник и жертва могут оставаться несколько минут. Наконец, *Portia* хватает жертву и прокалывает ее коготками хелицер (4). Пораженный паук пытается спастись, а *Portia* наблюдает за ним, ожидая, когда яд подействует и у жертвы начнутся судороги (5). Тогда *Portia* догоняет ее и съедает (6).

ты за сальтицидами — эти пауки наделены прекрасным зрением и способны к быстрому передвижению, что защищает их от нападения. Однако типичному пауку-скакуну, по-видимому, так же трудно узнать *Portia*, как это было поначалу трудно мне. Специальные адаптации, помогающие прятаться от врагов, очевидно, скрывают его и от жертв.

Подобная крипτικότητα, т.е. незаметность, достигается в значительной мере благодаря свойственной *Portia* манере передвигаться. Когда этот паук подкрадывается к другим сальтицидам, он ступает очень медленно; один шаг может длиться несколько секунд и приближает паука к жертве лишь на доли сантиметра. Между последовательными шагами паук часто делает остановки, во время которых шевелит педипальпами и ногами. Эти движения, независимо от того, идет ли паук в данный момент или остановился, выглядят лихорадочными и как бы механическими, в них может участвовать любое число ног в любых комбинациях и незаметно ни упорядоченности, ни синхронности в «жестах» разных ног. Каждая нога, прежде чем опуститься на субстрат, судорожно подергивается вверх и вниз, причем последовательность ее движений никогда, по-видимому, не повторяется. Кроме того, движения ног и педипальп не согласованы между собой и педипальпы часто незаметны вовсе, поскольку отведены назад и прилегают к хелицебрам, как при криптической позе покоя. (У спокойно идущего или у подкрадывающегося к хозяину чужой сети *Portia* педипальпы направлены вперед.) Беспорядочный характер движений *Portia* делает его вообще непохожим на паука и даже на живое существо; скорее, так может выглядеть мертвый лист в пробивающемся через полог леса неверном свете.

Portia приближается к пауку-скакуну только тогда, когда тот смотрит в другую сторону. Если же они оказываются «лицом к лицу», *Portia* останавливается, хотя и продолжает иногда шевелить педипальпами или ногами. Паук-скакун не проявляет никаких признаков ощущения надвигающейся опасности. Иногда он начинает чиститься, стирая одной из педипальп пыль с глаз. Иногда направляется прямо к ожидающему его хищнику и может даже оказаться под ним, но обычно *Portia* продолжает свое медленное безжалостное приближение, пока не встанет над маленьким пауком-скакуном, все еще глядящим в сторону и находящимся в неведении относительно грозившей ему беды. Наконец, *Portia* хватает свою жертву за стебелек — тонкий перешеек между головогрудью и брюшком



САМКИ *Portia* устраивают между собой схватки, нередко — за обладание ловчей сетью. Они упираются друг в друга хелицебрами и передними ногами и толкаются. Каждая пытается охватить своими ногами конечности соперницы, при этом иногда ноги отрываются. Когда одна самка изгоняет другую с паутины, она съедает оставленные той яйца.

(иногда он сразу же прокалывает стебелек), и тащит ее с камня или веточки дерева, где происходила охота, в свою сеть, чтобы там съесть. *Portia* проявляет удивительную настойчивость и когда подкрадывается к тенётным паукам, и когда охотится на скакунов. В Квинсленде, наблюдая за меченым *Portia*, я обнаружил, что он находился в одной и той же сети три дня подряд — два из них паук «примеривался» к хозяину сети и лишь на третий день съел его. В другом случае преследование и захват паука-скакуна продолжались в общей сложности примерно 90 мин. В лаборатории мне часто приходилось наблюдать, как *Portia* более часа мог подкрадываться к пауку-скакуну или непрерывно вызывать вибрацию чужой сети. В конечном счете его усилия почти всегда увенчивались успехом.

НЕОБЫЧНОЕ охотничье поведение *Portia* обусловлено более всего его острым зрением. Вибрация субстрата несет в себе информацию лишь о присутствии жертвы, но не о точной ее локализации. Если к сети, на которой нет никого, кроме *Portia*, приставить электровибратор, паук начинает дергать сеть, но не поворачивается в сто-

рону источника вибрации. Если же рядом на другой сети, отделенной от его собственной стеклянной перегородкой, блокирующей передачу вибраций, находится паук-жертва, то *Portia* поворачивается в его сторону. Он также узнаёт, кто находится за перегородкой: отличает пауков-скакунов от мух, муху за стеклом от своего собственного отражения в зеркале. *Portia* не обращает внимания на мух, пытается подкрасться к сальтицидам и угрожающе ведет себя по отношению к своему отражению в зеркале, принимая его, очевидно, за врага. Все эти реакции «узнавания» могут проявляться у *Portia* на расстоянии до 30 см, т.е. его дальность видения не меньше или даже больше, чем у многих других видов пауков-скакунов, изученных моим коллегой Э. Макнабом.

Органы зрения у *Portia* по существу такие же, как и у типичных представителей пауков-скакунов. Основная часть того, что известно о глазах представителей семейства Salticidae, включая особенности их поля зрения (см. рисунок внизу на с. 51), содержится в работе М. Лэнда из Суссекского университета. Покрывая глаза паука в различных комбинациях све-



PORTIA ПОДКРАДЫВАЕТСЯ к пауку-скакуну, находящемуся на листе. На земле и растительности *Portia* охотится иначе, чем на паутине, — он медленно и осторожно приближается к своей добыче. Пока маленький паук-жертва смотрит на *Portia*, тот не двигается и прячет педипальпы (вверху). Не подозревая об опасности, паук-скакун идет навстречу (в середине). Как только он отворачивается, все еще не ведая об угрозе (иначе он бы убежал), *Portia* возобновляет продвижение; он нападает только, когда оказывается над жертвой. Преследование может продолжаться иногда более часа и, как правило, оканчивается успехом.

тонепроницаемой краской, было нетрудно убедиться в том, что маленькие латеральные глаза обеспечивают ориентацию, а большие главные глаза — предметное зрение. Для получения необходимого разрешения возникающее на сетчатке главных глаз изображение объекта должно охватить как можно большее число фоторецепторов. У *Portia* и других пауков-скакунов это достигается благодаря двум анатомическим особенностям.

Первая из них заключается в том, что в главных глазах сетчатка располагается далеко от хрусталиков, на конце длинных трубочек, заходящих глубоко в головогрудь. Это увеличивает фокусное расстояние и, следовательно, размер сетчаточного изображения объекта. Но длина головогруды *Portia* только около 4 мм, и, значит, возможности увеличения изображения таким путем ограничены.

Д. Уильямс и П. Мак-Интайр из Австралийского национального университета в Канберре (АНУ) обнаружили у *Portia* второе анатомическое приспособление, усиливающее разрешающую способность глаза. Сетчатка каждого из главных глаз погружена в тканевое образование, имеющее форму конуса, обращенного широкой частью к глазу. Поскольку коэффициент преломления этой ткани больше, чем прозрачной жидкости в глазной трубке, впадина конуса, находящаяся непосредственно перед сетчаткой, действует как рассеивающая линза. Впадина конуса и собирающая линза хрусталика вместе «работают» как фотокамера с телеобъективом, увеличивая размеры сетчаточного изображения объекта и, следовательно, разрешающую способность глаза примерно на 50%. Главные глаза *Portia* (а также, как показал Д. Блест из АНУ и других пауков-скакунов) можно рассматривать как миниатюрные телескопы Галилея. Сходные системы с рассеивающими линзами А. Снайдер из АНУ и У. Миллер из Медицинской школы Йельского университета обнаружили у ястребов и соколов. Как и у сальтицид, у этих птиц выработалось приспособление, обеспечивающее сильное зрение при относительно маленькой голове.

ОСТРОЕ зрение не только дает *Portia* возможность вести образ жизни активного хищника — оно играет также очень важную роль во внутривидовых взаимоотношениях особей у этого паука. Одним из наиболее ярких примеров демонстрационного поведения перед особями своего пола у *Portia* является поза «согнутые ноги», при которой первые три пары ног сильно согнуты и прижаты к телу (обычно же двумя первыми парами

ног паук машет вверх и вниз). Часто можно наблюдать, как два *Portia* качиваются из стороны в сторону или кружатся один около другого на близком расстоянии. У прочих пауков-скакунов тоже существуют подобные демонстрации, играющие роль знаковых стимулов, но у *Portia* они выглядят особенно угрожающе.

Поведение самок по отношению друг к другу отличается еще большей выразительностью. Плотно прижавшись «лицами», выпустив коготки хелицер и расставив ноги, две самки энергично толкаются. Когда кому-то из них удастся схватить соперницу с помощью одной или нескольких ног, начинается борьба, нередко сопровождающаяся потерей части конечностей. Наконец, одна из соперниц уступает. Иногда, защищая свои владения, самка прижимает захватчицу к другому пауку своего вида, помогающему ей защищать ее сеть; если же хозяйка сети будет изгнана, то захватчица немедленно поедает ее яйца и на их место может отложить свои.

Преследуя добычу и избегая хищников, *Portia* старается остаться незамеченным: он движется медленно и точно неживой, но в общении с представителями своего вида, когда нужно не только видеть самому, но и быть увиденным другими, необходимость в таких приемах отпадает. Особенно при ухаживании *Portia* проявляет большую подвижность, что резко контрастирует с его поведением во время охоты. Самки часто устремляются по сети навстречу ухаживающим самцам и иногда это завершается тем, что самка прыгает на самца с расстояния в несколько сантиметров. Такое поведение, однако, необязательно свидетельствует о потере самкой рецептивности. Спасшись бегством, самец обычно возобновляет потом свои ухаживания и иногда в конце концов копулирует с нападавшей на него самкой. Зрительные знаковые стимулы самца *Portia* включают ряд специальных поз и движений ног, сходных с теми, которые свойственны типичным паукам-скакунам. Когда самец находится еще довольно далеко от самки, он поднимает две распрямленные передние ноги, вытягивает их вперед под углом к телу и не синхронно машет ими вверх и вниз. Приблизившись к самке, он делает другую демонстрацию — быстро машет поднятыми передними ногами, сводя их вместе и разводя в стороны. Наконец, он взбирается на самку и начинает копулировать. У типичных пауков-сальтицид самки во время копуляции стоят всеми ногами на субстрате, но *Portia* и здесь ведет себя необычно — часто самка с самцом на спине спускается с листа на паутинной нити.



УДАЧНАЯ ОХОТА на паука-скакуна кончается тем, что *Portia* хватает жертву хелицерами. Обычно *Portia* возвращается затем на свою ловчую сеть, таща добычу за собой. Поскольку *Portia* может поглощать только жидкую пищу, он с помощью ротового аппарата вводит в тело жертвы ферменты, под действием которых ее внутренние ткани разжижаются. Затем *Portia* высасывает жидкость, а сухие остатки жертвы сбрасывает с сети.

Самец осуществляет демонстрации как находясь на паутине, так и вне ее. В первом случае в комплекс действий самца, составляющих процесс ухаживания, входит еще и подача сигналов путем вибрации сети. В этом отношении *Portia* похожи на типичных тенетных пауков, которые, не обладая хорошим зрением, в качестве знакового стимула при общении с представителями своего вида используют вибрацию паутины. Например, чтобы привлечь внимание самки во время ухаживания, самец-хозяин сети определенным образом ударяет по паутине педипальпами.

Самец *Portia* при ухаживании вызывает специфическую вибрацию сети с помощью особой «походки», но делает это, только если самка тоже находится на сети. Как правило, такую «судорожную походку» самец использует наряду со зрительными знаковыми стимулами. Однако было экспериментально показано, что решающую роль играют не они, а именно вибрация сети, вызываемая «судорожной походкой» самца: в опыте пара ослепленных *Portia* нормально осуществляла ухаживание и копуляцию. По-видимому, специфическая вибрация субстрата позволяет самке установить местонахождение ее партнера. В свою очередь поведение самца стимулируется ольфакторными сигналами (феромонами), исходящими от самки. Коммуникация посредством запахов крайне необычна для пауков-скакунов, но также является характерным

компонентом ухаживания у типичных тенетных пауков.

ИТАК, когда *Portia* находится на паутине и особенно если он лишен возможности пользоваться зрением, он ведет себя при ухаживании подобно тенетным паукам; поведение же *Portia* вне ловчей сети сходно с таковым других пауков-скакунов, использующих зрительные знаковые стимулы. Эти наблюдения говорят о том, что *Portia* не просто зоологическая «диковинка», а представляет большой интерес с эволюционной точки зрения. Здесь можно сослаться на Ф. Уонлесса из Британского музея естественной истории, который полагает, что *Portia* — один из наиболее примитивных среди существующих в наше время сальтицид. Его доводы в пользу такой гипотезы основаны на морфологических данных, в частности на том, что у *Portia* имеется функционирующая средняя пара латеральных глаз, которые у большинства пауков-скакунов дегенерировали и остались лишь в виде рудиментов. Необычное поведение *Portia* может послужить ключом к пониманию происхождения семейства Salticidae и сложных глаз у его представителей.

Блест и я предложили следующую гипотезу эволюции пауков-скакунов. Общим предком *Portia* и типичных Salticidae был тенетный паук со слабым зрением. Этот предок занимал биотопы, подобные дождевым лесам Квинсленда, где было множество

ловчих сетей пауков других видов, которые нередко оказывались по соседству с его паутиной. Поскольку на соседних сетях было много того, что можно использовать в пищу, дальний предок сальтицид научился вторгаться на чужие сети. Вначале информацию о том, где находится жертва, он извлекал из вибрации сети, так же как и современные тенётные пауки. Однако для него вибрационный сигнал не был столь надежен, как для хозяина сети, поскольку характер вибрации зависит от свойств паутины, неодинаковых у разных видов пауков. Поэтому эволюционный успех мог сопутствовать только тем особям предкового вида, которые были способны обнаруживать добычу в сетях любого типа, используя информацию, независимую от свойств сети, т.е. зрительную.

Коль скоро предковый вид специализировался на вторжении в чужие сети, его представителям приходилось покидать свои сети и рыскать по земле в поисках новой паутины для охоты. В этой ситуации, вероятно, развилась способность бегать и перепрыгивать через препятствия. Одновременно усовершенствовавшееся зрение дало возможность охотиться на подвижных насекомых. А преимущества активной охоты на насекомых, скорее всего, заставили его предпочесть ее тактике вторжения на чужие сети: численность насекомых обычно выше, чем численность пауков других видов, и, кроме того, их ловить быстрее, так как нет нужды медленно подкрадываться к жертве. Как только наш паук прекратил «разбойничать» на чужих паутинах и начал питаться насекомыми, которых он ловил на земле, у него отпала необходимость строить свои собственные сети. С этого момента началась дивергентная эволюция и образовалось множество видов сальтицид, приспособленных к различным условиям обитания.

Именно тогда могла произойти дивергенция типичных сальтицид и *Portia*, сохранившего способности и к постройке собственной паутины, и к вторжению на чужие сети. Возможно, эти способности остались у *Portia* благодаря специфическим условиям среды: они продолжали жить в биотопах, где было много сетей других пауков. Еще одной вероятной причиной могло быть то, что переход *Portia* целиком на скоростное преследование насекомых привел бы к потере им важного приспособительного свойства, спасающего от хищников — умения принимать криптическую позу, делающую его похожим на лист. В то же время манера осторожно приближаться к жертве не исключала крип-

тических поз и была очень удобна для охоты на тенётных пауков, которых спугивало бы стремительное движение. Когда в квинслендском дождевом лесу повысилась численность других видов пауков-скакунов, умение *Portia* принимать криптические позы и привычка двигаться медленно могли пригодиться ему для использования нового богатого источника пищи.

У типичных пауков-скакунов есть некоторые признаки, свидетельствующие об их происхождении от тенётных пауков. Хотя сальтициды не плетут сетей, они строят трубчатые гнезда из паутины, чаще всего под камнями или в каких-нибудь других темных укромных местах. Самки откладывают в гнездах яйца и обычно остаются там на период неактивности. Еще более существенна следующая особенность поведения. Когда в темном гнезде самец паука-скакуна натягивается на самку, он не пытается привлечь ее с помощью обычных для него поз и движений. Вместо этого он пользуется при ухаживании вибрацией, например тянет особым образом взад и вперед паутинную нить, захватив ее ногами или коготками хелицер. (Иногда *Portia* с успехом извлекает паука-скакуна из его гнезда, дергая за паутину подобным же образом.) Когда впервые около десяти лет назад стало известно о таких особенностях поведения Salticidae, это вызвало удивле-

ние, поскольку большинство ученых придерживались традиционной точки зрения, согласно которой все пауки-скакуны общаются только посредством зрения. Наиболее логично думать, что типичные пауки-скакуны сохранили лишь некоторые черты поведения своих предков, строивших сети, а у *Portia*, представляющего собой промежуточное эволюционное звено, такие черты сохранились в большей степени. Быть может, эта гипотеза никогда не будет доказана, но она позволяет сделать поддающиеся проверке предсказания. Можно, например, ожидать, что паук наподобие *Portia*, попав в биотоп, где численность пауков-скакунов значительно меньше, чем в Квинсленде, перестанет охотиться на них.

В этой статье я все время для краткости вместо полного названия вида *Portia fimbriata* употреблял наименование *Portia*, которое в действительности относится к роду, включающему около десятка известных видов, обитающих в самых различных условиях. Мы с коллегами продолжаем изучать поведение некоторых из видов рода *Portia*, а также ряда примитивных сальтицид. Путем сравнения результатов наблюдений за разными видами мы надеемся разобраться в загадочной эволюционной истории этого единственного в своем роде семейства пауков.

Наука и общество

Перекачка тепла

СОТРУДНИКИ Лос-Аламосской национальной лаборатории разработали тепловой «насос», в котором плотность «перекачиваемой» энергии достигает 24 тыс. Вт/см² — больше, чем на поверхности Солнца, и на 20% больше, чем в любом другом устройстве, передающем тепло.

Насос, созданный М. Мерриганом, Э. Кедди, Т. Сена и С. Лимбаком, состоит из трех основных частей: кожуха, внутреннего стержня и рабочей жидкости. Кожух представляет собой закрытый с обоих концов молибденовый цилиндр длиной 4 м, диаметром около 2 см, с толщиной стенок 0,7 мм. Стержень — это свернутая в цилиндр мелкая сетка, сплетенная из молибденово-ренийевой проволоки; она находится внутри кожуха, причем расстояние между стенками цилиндров равно 0,5 мм. Пространство между стержнем и кожухом

заполнено расплавленным литием, который играет роль рабочей жидкости. Поверхностное натяжение не дает литию просочиться сквозь сетку и попасть внутрь стержня.

В процессе работы один конец трубы-насоса помещается вблизи источника тепла. Молекулы лития, находящиеся у этого конца, испаряются и попадают внутрь стержня. Плотность газообразного лития здесь настолько мала, что молекулы пролетают от «испарителя» до «конденсатора», т.е. от одного конца трубы до другого, почти со скоростью звука, мало замедляясь за счет столкновений с другими молекулами. На конце — «конденсаторе» молекулы лития вновь проходят через сетку и поглощаются жидким литием, отдавая при этом часть своей энергии. Под действием капиллярных сил жидкий литий течет назад к концу — «испарителю», где процесс возобновляется. Каждую секунду от одного конца тру-

бы к другому движется около 2 г лития. Рабочая температура насоса — 1500 К, разность температур между концами трубы — около 10°.

Такое устройство будет, вероятно, особенно эффективным в космическом пространстве. Находящийся на орбите ядерный реактор может, к примеру, потребовать применения таких труб для того, чтобы распределять энергию между другими системами, размещенными в космосе.

Фальшивый звон

ПОСЛЕ трех-четырех веков безукоризненной службы колокола на голландских колокольнях стали фальшивить. Началось это примерно 25 лет назад.

Причина такого явления — кислотные дожди, которые разрушают металл. В результате коррозии стенки колоколов становятся тоньше и их звучание изменяется. Маленькие колокола подвергаются коррозии быстрее, чем большие. Соответственно звучание различных колоколов изменяется несогласованно и подбор колоколов звучит все менее гармонично. Выйти из положения можно, если понизить тон больших колоколов, удалив с их внутренней поверхности часть металла, и тем самым подогнать частоты друг к другу.

Виновником бедствия является богатый серой уголь, который сжигался в Нидерландах до 60-х гг. Диоксид серы вместе с дымом попадал в атмосферу, смешивался с атмосферной влагой и превращался в серную кислоту, которая (в виде дождевых осадков) попадала на колокола. А. Лейр из компании Royal Eijsbouts, главного литейного предприятия в Нидерландах, полагает, что повреждены, вероятно, все 15 тыс. (или около того) колоколов, находящихся в стране. Принимая во внимание масштаб ущерба, министр Нидерландов по проблемам окружающей среды распорядился о проведении исследования по вопросу о связи между загрязнением воздуха и звучанием колоколов.

Органические транзисторы

НЕКОТОРЫЕ органические полимеры в окисленной форме (т.е. отдавшие электроны) — хорошие проводники, в восстановленной — (приобретшие электроны) — диэлектрики. М. Райтон с сотрудниками, рабо-

тающий в Массачусетском технологическом институте, использовали это свойство для создания транзисторов, построенных на полимерах, а не на полупроводниках, таких, как кремний.

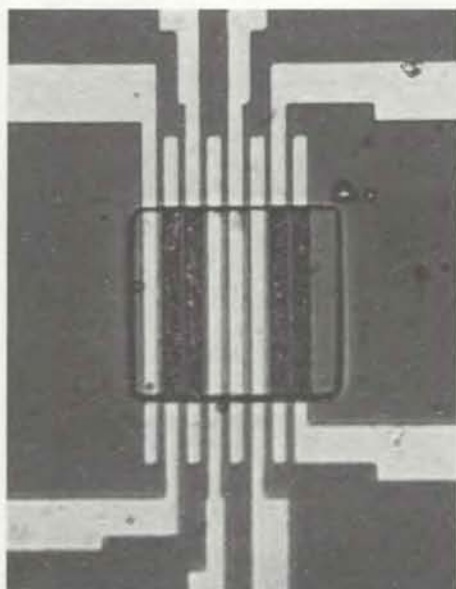
Обычный униполярный транзистор имеет три металлических электрода, называемых исток, сток и затвор, прикрепленных к кристаллу кремния, который делится на зоны с различными электронными свойствами. Напряжение, приложенное к затвору, открывает или закрывает «канал» для движения электронов в кремнии, по которому течет ток между истоком и стоком. В каком-то смысле транзистор можно рассматривать как усилитель или реле — небольшой электрический сигнал, приложенный к затвору, позволяет значительно большему сигналу пройти между истоком и стоком.

В устройстве, разработанном Райтоном, истоком и стоком служат две золотые полоски, покрытые тонким слоем полимера, типа полипиррола или полианилина; вся конструкция находится в растворе электролита (в таком растворе, где могут протекать электрохимические реакции). Роль затвора в этом случае выполняет электролит, а роль электронного «канала» между истоком и стоком — полимер. Если электролит окисляет полимер, ток через полимер течет от одного золотого электрода к другому. Если же под воздействием электролита полимер переходит в восстановленное состояние, он превращается в диэлектрик и электрический ток не течет. Кажется парадоксальным, что некоторый материал становится луч-

шим проводником, когда находится в окисленном состоянии, т.е. когда содержит меньше электронов. В полипирроле, однако, проводником тока служат не электроны, а «дырки» (области с положительным зарядом, которые образуются в тех местах, откуда удалены электроны).

Транзисторы, основанные на полимерах, могут с успехом применяться в тех устройствах, которые предназначены для обнаружения определенных химических веществ. Если изготовить полимер, который окисляется только под действием определенных химических веществ, то его можно использовать для создания устройства, в котором ток течет лишь в присутствии этих специфических окислителей. Такой чувствительный элемент на полимерной основе мог бы быть «встроен» в миниатюрный микропроцессор, выполненный в виде кристалла кремния.

Некоторые из полимеров, изученных Райтоном и его сотрудниками, обладают свойством, которое делает их особенно пригодными для изготовления таких устройств. Подобно полипирролу, эти полимеры становятся проводниками, когда от восстановленного состояния переходят к окисленному; однако в отличие от полипиррола при дальнейшем окислении эти полимеры вновь становятся диэлектриками. Варьируя размер и положение этого «окошка», в котором полимеры являются проводниками, можно изготовить такие чувствительные элементы, которые будут обнаруживать определенные химические вещества, не реагируя на более сильные окислители.



Два органических транзистора (слева), состоящих из золотых электродов, покрытых полимером (справа)

Оговорки

Оговорки позволяют судить о психических процессах, лежащих в основе одного из сложнейших видов человеческого поведения — речи. С помощью определенных методик речевые ошибки можно изучать в условиях лабораторного эксперимента

МАЙКЛ Т. МОТЛИ

НЕСКОЛЬКО лет назад мне предстояло пройти собеседование при приеме на работу. За день до этого меня познакомили с человеком, который также претендовал на это место. Прощаясь с ним, я протянул ему руку и вместо традиционного «Буду рад вас видеть» неожиданно для себя произнес: «Буду рад вас выбить».* Теперь мы оба смеемся, когда вспоминаем этот случай, — ни он, ни я желаемого места не получили. Однако в тот момент моя оговорка вызвала довольно сильный конфуз.

Что же заставило меня оговориться? Почти столетие тому назад Зигмунд Фрейд утверждал, что в каждой речевой ошибке кроется свой скрытый смысл. В частности, он считал, что оговорки выдают скрытые мотивы и тревогу.

Среди исследователей, изучавших язык и психические процессы, лежащие в основе продуцирования речи (говорения), эта гипотеза долгое время оставалась непопулярной. «Фрейдovou оговорку» трудно исследовать в лаборатории, поэтому от его гипотезы отказывались в пользу других, легче поддававшихся экспериментальной проверке. Теоретики были склонны рассматривать продуцирование речи как более или менее независимый процесс, исключая спонтанное воздействие мотивов, тревожности или других факторов, не имеющих прямого отношения к содержанию высказывания.

Категоричность, с которой Фрейд настаивал на наличии скрытого смыс-

* Передача оговорок близкими по смыслу русскоязычными эквивалентами не всегда возможна. Поэтому при переводе статьи осуществлены некоторые замены, иллюстрирующие описываемые автором явления на материале русского языка. Там, где это было необходимо, несколько изменены ситуативные контексты. Использованные для замен реальные оговорки носителей русского языка взяты из материалов, предоставленных сотрудником Института психологии АН СССР А. Н. Харитоновым. — *Прим. ред.*

ла во всякой оговорке, делала его идею еще менее привлекательной. Действительно, трудно представить, что, когда однажды за обедом моя шестилетняя дочь попросила помочь ей разрезать «мифштекс» (meef), это было результатом подавления тревожности или что-то в этом роде. Более правдоподобно, что она просто соединила слово «мясо» (meet) и «бифштекс» (beaf) в «мифштекс» (meef). Точно так же, если кто-то сказал «грунный лунт» вместо «лунный грунт», то единственный «скрытый смысл», который здесь можно вообразить, — это взаимная перестановка «гр» и «л». Однако и в этом случае остается вопрос: как получается, что в ходе продуцирования речи сливаются два слова или меняются местами звуки? И может быть, в отношении моей оговорки, упомянутой в начале статьи, Фрейд был бы прав.

Эти вопросы и другие, с ними связанные, в последнее десятилетие вновь попали в поле зрения исследователей. Парадоксально, но факт: причиной возобновления интереса к оговоркам было изучение продуцирования «правильной» речи. Устная речь — это один из наиболее сложных и загадочных видов поведения человека, упорно сопротивляющийся попыткам смоделировать его на

ЭВМ. Тот факт, что обычно речь продуцируется безошибочно, делает этот процесс еще более примечательным. Для того чтобы человек мог выразить мысль, должно произойти по меньшей мере следующее: слова должны быть подобраны соответственно смыслу высказывания и организованы в порядке, который не противоречит грамматике языка, а гортани, языку и губам должна быть дана соответствующая двигательная команда. Принятие всех этих решений и подача соответствующих сигналов происходят одновременно, поэтому трудно допустить, что они управляются сознательно. С другой стороны, произносимое людьми часто настолько оригинально (если не по мысли, то хотя бы как последовательность слов), что речь едва ли может быть признана результатом чисто рефлекторной деятельности.

Сложность и высокая эффективность процесса продуцирования речи делают его весьма трудным объектом для исследования. Его составляющие — принятие решений и другие операции — протекают настолько быстро, что изолировать их и изучить по отдельности практически невозможно. Поэтому можно лишь порадоваться (для исследователя речи это по крайней мере весьма ценно), что люди де-

ТРИ МЕТОДИКИ исследования речевых ошибок в лабораторных условиях основаны на считывании слов с экрана. По фонетической методике (а) испытуемый работает в условиях, предрасполагающих его к случайным перестановкам звуков в словах. Испытуемый про себя читает появляющиеся на экране пары слов. По сигналу зуммера (звездочки) испытуемый должен произнести вслух то, что читает в момент подачи сигнала. Предшествующие пары слов подобраны так, что их начальные звуки моделируют ожидаемую оговорку, о чем испытуемому не известно. Таким способом формируется предрасположенность испытуемого к оговорке. Предсказуемые оговорки: «ложь и ножка» (вместо «нож и ложка»), «зонный трал» (вместо «тронный зал»). По методике конфликта порядка слов (b) при появлении на экране команды «ПЕРЕСТАВЬТЕ» испытуемый должен произнести слова читаемой пары в обратном порядке. При появлении команды «ПОВТОРИТЕ» — просто произнести вслух читаемое. Предсказуемые оговорки здесь: «стук и звон» или «звон и стук» (вместо «звук и стон» или «стон и звук»). По методике конкурирующих предложений (c) на экране на 10 с появляются два предложения, каждое из которых помечено буквой (здесь Т и М). Затем после 5-секундного перерыва на экране появляется буква (здесь М), сигнализирующая о том, какое из двух предложений испытуемый должен произнести. Предсказуемая оговорка: «Спроси ему, когда там надо быть».

a

БЫЛЬ
И СКАЗКА

КРУГ
И ТОЧКА

ЛУК
И НОЖНЫ

ЛОСЬ
И НОРКА

НОЖ
И ЛОЖКА



КРАСНЫЙ
ЦВЕТ

ЗЫБКИЙ
ТРАП

ЗОЛЬНЫЙ
ТРАКТ

ТРОННЫЙ
ЗАЛ



b

ЛАК
И БЛЕСК

ДУБ
И КЛЕН

ЗВУК
И СТОН

ПЕРЕСТАВЬТЕ

ШЕРСТЬ
И ВОРС

БОР
И ХРОМ

ТОР
И ШАР

КОК
И ТОРТ

ПОВТОРИТЕ

c

Т: Спроси его,
когда там
надо быть
М: Спроси, когда
ему там
надо быть



М

лают речевые ошибки. В сущности, оговорка представляет собой как бы моментальный срез процесса продуцирования речи — естественный препарат, доступный наблюдению. Если кто-то говорит «шрифт» вместо «штрих», то такая ошибка позволяет заглянуть в процесс выбора слова говорящим. Другие потайные дверцы приоткрываются на мгновение, когда говорящий переставляет звуки («мышка с кышкой» вместо «кошка с мышкой») или замещает один звук другим («брузка» вместо «блужка»).

ПРОБУЖДЕНИЕМ интереса к исследованиям оговорок мы во многом обязаны В. Фромкин из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Начиная с 60-х годов она регистрирует речевые ошибки, с которыми встречается в повседневном общении. За прошедшие годы Фромкин и ее коллеги собрали несколько тысяч примеров оговорок. Свои собственные коллекции стали собирать и другие исследователи — и в результате этой работы удалось обнаружить, что речевые ошибки подчиняются определенным закономерностям.

Когда оговорки заключаются в перемещении слов, то взаимно переставляемые слова почти всегда относятся к одной и той же синтаксической

(грамматической) категории. Существительные меняются местами с существительными (например: «Ты положил чай в сахар?»), глаголы — с глаголами («Вымой белье и выстирай посуду!») и т.д. Эта закономерность позволяет предположить, что в лексиконе (индивидуальном словаре) говорящего слова организованы по грамматическим категориям. Другой тип оговорок — «Все равно я ее споймаю!» или «Главное — не путать падежов!» — свидетельствует о том, что элементы точной подстройки по синтаксическим категориям (временные показатели глагола, показатели рода, числа и падежа существительных и т.д.) в составе слов не хранятся, а скорее лишь прибавляются в процессе продуцирования речи. (Это верно, если допустить, что индивидуальный лексикон говорящего не включает «запрещенные» нормативным языком формы.)

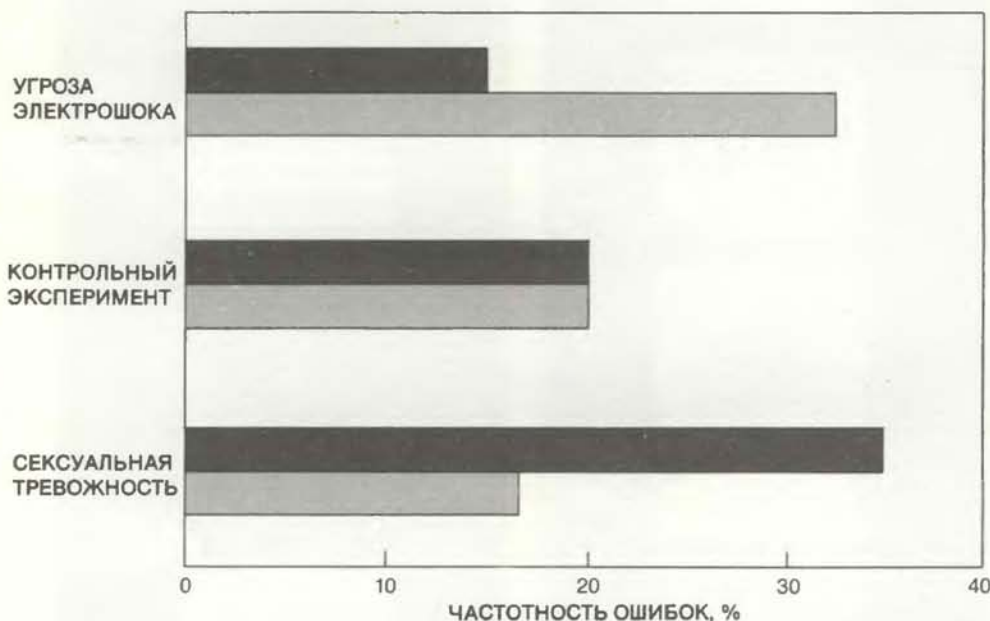
Анализ естественных оговорок позволяет довольно много узнать о том, как организованы языковые элементы в человеческой психике. В то же время он мало что дает для понимания способа перестройки этих компонентов при говорении. Одним из приемов исследования переработки элементов языка человеческой психикой является изучение речевых оши-

бок в лабораторных условиях. Для автора статьи это и было определяющей линией исследований на протяжении последних 10 лет. Большая часть работы была выполнена совместно с Б. Баарсом из Калифорнийского университета в Сан-Франциско и К. Кэмденем из Кливлендского университета.

Было разработано несколько методик побуждения испытуемого к совершению речевых ошибок — случайных для говорящего, но предсказуемых со стороны экспериментатора. Одна из наиболее надежных методик позволяет наблюдать оговорки типа «ложкизмы» (буквальный перевод термина «spoonerism», происходящего от английского «spoon» — ложка. — *Перев.*) — взаимной перестановки звуков в примыкающих или близко стоящих словах. Примерами таких оговорок могут служить «ложь и ножка» вместо «нож и ложка» или «зонный трал» вместо «тронный зал». Для того чтобы спровоцировать оговорку типа «ложкизм», ключевые словосочетания («нож и ложка», «тронный зал», т.е. те, которые должны произносить испытуемый) включаются в списки вместе с другими словосочетаниями. Каждое словосочетание на короткое время высвечивается на экране перед испытуемым. (В наши дни — это обычно дисплей терминала ЭВМ, на котором словосочетания предъявляются с интервалом приблизительно в одну секунду.)

Испытуемому предлагают читать эти словосочетания про себя. По сигналу зуммера он должен произнести только что прочитанное словосочетание вслух. Сигналы сопровождают появление тех ключевых словосочетаний, при воспроизведении которых испытуемым вероятно оговорка. При этом два или три непосредственно предшествующих словосочетания построены таким образом, что их фонетическая форма как бы подталкивает испытуемого к совершению речевой ошибки: звуки, перестановка которых ожидается в ключевом словосочетании, в них уже стоят на нужных позициях. Например, словосочетанию «мой руки» могут предшествовать сочетания «рви маки», «режь мясо» и т.д. Они создают у испытуемого предрасположенность к совершению оговорок «рой муки». Испытуемые совершают в среднем одну ошибку на каждые три ключевых словосочетания.

В своих важнейших чертах речевые ошибки, совершаемые при использовании этой методики, неотличимы от естественных оговорок. Варьируя отдельные элементы этой методики, исследователь может проверять различные гипотезы о продуцировании ре-



«ФРЕЙДОВЫ ОГОВОРКИ» были получены автором и его коллегами экспериментально. Испытуемые (студенты мужского пола) наблюдали одну и ту же последовательность слов на экране терминала. В одном эксперименте («Угроза электрошока») испытуемых предупреждали, что они получат неожиданный удар электрическим током через закрепленные на их теле электроды. Удара они не получали, но состояние тревожности, вызванное предупреждением, выразилось в преобладании количества оговорок, по смыслу связанных с электричеством (серые прямоугольники). Примером таких оговорок является «бродит ватт» вместо «водит брат». В другом эксперименте («Сексуальная тревожность») присутствие привлекательной женщины вызывало преимущественно оговорки сексуального содержания (черные прямоугольники), например «кок и секс» вместо «сок и кекс». Эти результаты подтверждают гипотезу (по крайней мере в рамках данного эксперимента), согласно которой оговорки выдают скрытую тревожность.

чи. Наглядным примером этого является проверка гипотезы Фрейда. При проверке этой гипотезы по методике спровоцированных оговорок исследователь должен быть уверен, что в момент эксперимента испытуемый имеет данную мотивацию или находится в состоянии тревожности.

В НАШИХ первых экспериментах по «Фрейдским оговоркам» мы использовали два способа формирования состояния тревожности у испытуемых. (Ими были мужчины студенческого возраста.) В первой серии экспериментов мы закрепляли на теле испытуемых электроды и предупреждали их, что во время эксперимента они неожиданно получат сильный удар электрическим током. На самом деле испытуемые никакого удара не получали: наш замысел состоял лишь в том, чтобы создать у них состояние тревоги. Во второй серии экспериментов мы просили привлекательную и довольно легкомысленно одетую девушку сыграть роль экспериментатора. В третьей серии экспериментальные условия были нейтральными. Список предъявлявшихся словосочетаний во всех трех случаях был один и тот же. Он включал равное число ключевых словосочетаний, которые могли вызвать оговорки, имеющие смысловую связь с ударом тока и с сексуальным влечением.

В результате мы получили то, что предсказал бы Фрейд: испытуемые, находившиеся в состоянии тревожности, делали гораздо больше оговорок, связанных с источником тревоги, чем не имеющих к нему отношения. Угроза электрического разряда заставляла испытуемых особенно часто говорить «бродит ватт» вместо «водит брат», «битый шоком» вместо «шитый боком», «сталь и ток» вместо «галь и сток». В присутствии легкомысленно одетой «экспериментаторши» наиболее частыми оговорками были: «секс и койка» вместо «кекс и сойка», «мот и киска» вместо «кот и миска», «вор и торс» вместо «тор и вор».

Испытуемые, которые должны были участвовать в эксперименте с привлекательной «экспериментаторшей», предварительно заполняли бланки стандартного теста сексуальной тревожности. (Этот тест, в котором предлагается ответить утвердительно или отрицательно на ряд вопросов, известен под названием «Moshier Sex Guilt Inventory».)

Испытуемые, чье тестирование свидетельствовало о сексуальной тревожности, делали наибольшее число оговорок, по смыслу связанных с сексом. Это подтверждает гипотезу Фрейда, согласно которой оговорки в

ТИП	СТИМУЛ	ОГОВОРКА
ФОНЕТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ		
Антиципация	«побит и раздет»	«разбит и раздет»
Персеверация	«красный грот»	«красный крот»
Перестановка («ложкизм»)	«Принеси нож и ложку!»	«Принеси ложь и ножку»
Замена	«блузка»	«брузка»
Добавка	«мешок»	«смешок»
ЛЕКСИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ		
Перестановка	«Это — мажордом»	«Это — дом-мажор»
Слияние	«Смешение и слияние»	«смеяние»

ТИПЫ ОГОВОРК выделяются в зависимости от их характера: в одних переставляются звуки, в других переставляются или сливаются слова. Обычно произносимое при оговорке слово стремится сохранить языковую значимость. Другими словами, большая часть ошибочных последовательностей звуков действительно встречается в языке. «Шгром» относится к нетипичным оговоркам.

речи свидетельствуют о тревожности, скрываемой человеком от других. В самом деле, трудно ожидать, что испытывающий сексуальную тревожность мужчина будет открыто выражать это свое состояние. С наибольшей вероятностью он сделает это неосознанно — оговариваясь в речи.

ПОЛУЧЕННЫЕ экспериментальные данные подтверждают также мысль о том, что даже информация, не связанная с содержанием предполагаемого высказывания говорящего, влияет на продуцируемое сообщение. Каков механизм такого влияния? Здесь полезно рассмотреть «двусмыслицы», т.е. непреднамеренные каламбуры. Один смысл высказывания такого типа прямо относится к тому, что собирался сообщить говорящий. Второй относится к другой мысли говорящего, которую он, однако, не собирался высказывать. Один из моих коллег, рассматривая иллюстрированный альбом наскальных надписей, сказал мне: «Да тут некоторые прямо настенные!» Разумеется, имелось в виду не место, а смысл. Мой сосед, пытаясь утихомирить ребенка, стучавшего молотком по водопроводным трубам, крикнул ему: «Тихо труби!»

В отличие от «Фрейдских оговорок» двусмыслицы не представляют собой рассогласования между тем, что было сказано, и тем, что предполагалось сказать. В высказывании ошибки нет. Однако можно подозревать, что на некоторые особенности высказывания влияют те мысли говорящего, которые он не намеревался сообщать. Такую догадку хорошо иллюстрируют двусмыслицы, создающие ситуацию замешательства. Вообразите себе последствия такого, на-

пример, поздравления коллегами своего тучного сослуживца: «Ну вот и вас произвели из тонких в толстые!» Здесь-то и возникает вопрос: не влияют ли посторонние мысли и эмоции на выбор лексики? Что касается двусмыслиц, то лабораторные исследования позволяют ответить на этот вопрос утвердительно. Если испытуемых просят завершить фразу: «Дешевые иллюстрированные журналы часто публикуют... сообщения», можно ожидать, что слова «неточные», «сенсационные» и «безответственные» будут употреблены с такой же частотой, как и «потрясающие». Однако в ожидании момента, что их «тряхнет» током, испытуемые вставляют слово «потрясающие» чаще других слов.

Наиболее привлекательная теория, которая объяснила бы механизмы «Фрейдских оговорок» и непреднамеренных двусмыслиц, возникла в когнитивной психологии и разрабатывается сейчас в области искусственного интеллекта. Эта теория постулирует «распространение возбуждения» по лексикону. При этом считается, что каждое слово лексикона соединено ассоциативными связями с рядом других. Предполагается, что семантические требования (смыслы) сообщения, находящегося в процессе формирования для высказывания, активизируют ассоциативные связи. Далее принимается, что возбуждение распространяется по лексикону на манер цепной реакции. Согласно теоретическим предположениям, по мере распространения возбуждения его сила угасает. (Имеются предварительные данные о том, что наиболее сильной является активация семантических ассоциаций, более слабой — фонетических, еще более слабой — синтаксических. Другими словами, сильнее дру-

гих ассоциации по смыслу, несколько слабее — по звучанию и, наконец, самые слабые — грамматические ассоциации.) Лексические единицы могут быть взаимосвязанными, поэтому предполагается, что распространяющееся возбуждение может вернуться к единице, уже активизированной ранее. Таким образом, единица лексикона может накопить возбуждение, по уровню превышающее исходное. Из этой теоретической модели следует, что возможен неосознаваемый выбор слов для высказывания, т.е. единица лексикона с наиболее высоким уровнем активации будет включена в высказывание автоматически.

РАССМОТРИМ теперь модифицированный вариант модели распространяющегося возбуждения. Пусть единицы лексикона активизируются не только мыслями, которые должны

быть высказаны, но и посторонними мыслями. С помощью этой модели можно описать неосознанные двусмыслицы и «Фрейдовы оговорки». Если единица лексикона, аккумулирующая активацию в ходе подготовки сообщения, может получить дополнительное возбуждение за счет ассоциации с посторонней мыслью, то это значительно повышает вероятность ее выбора для включения в высказывание. Однажды мне довелось слышать такое замечание: «Чекерсская речь шла по следу (dogged*) Никсона на протяжении всей его политической карьеры». Родился неожиданный каламбур, поскольку известная «Чекерсская речь» Никсона получила свое название благодаря тому, что он ссылался в ней на свою собаку по кличке

* Происходит от слова «dog», означающего «собака». — Прим. перев.

Чекерс. Вероятно, в качестве претендентов на роль группы сказуемого активизировались первоначально различные единицы лексикона. Но ассоциация названия речи с кличкой собаки дала дополнительную активацию группе «идти по следу».

Весьма сходным образом могут быть объяснены многие речевые ошибки. Недавно, когда мы с приятелем говорили о различных сортах виски, он упомянул «Черный Дэниелс», имея в виду, конечно, «Джек Дэниелс». Вероятно, лексическая единица «черный» активизировалась сразу по нескольким причинам — и потому, что ярлык на бутылке «Джек Дэниелс» действительно черный, и потому, что есть сорт виски «Черный Ярлык». Получив наибольшую активацию, эта единица была выбрана из лексикона автоматически. Аналогичные ошибки мы наблюдали в экспери-

ВЫСКАЗЫВАНИЕ — ЦЕЛЬ	ОГОВОРКА	ИСТОЧНИК КОНФЛИКТА
а «Нам будет нужна синяя книжка» «Здесь необходимо органическое единство»	«Нам будет нужна черная книжка» «Здесь необходимо оргазмическое единство»	Белый студент говорит черному после урока истории, на котором речь шла о гражданских правах Профессор говорит привлекательной студентке
б «Эта новая комбинация не уступит Джону Диру» «Он — шире»	«Этот новый комбайн не уступит Джону Диру» «Он — Ширли»	Разговор о слиянии двух фирм, которые, как и фирма «Джон Дир», производят комбайны Из беседы об игрушечных постройках. У говорящего есть игрушка «Замок Ширли»
в «жарко» «креветка»	«жарно» «лангетка»	«жарко» против «знойно» «креветка» против «лангуст»
г «лунный грунт» «переносный смысл»	«грунный лунт» «пересмысл»	«грунт» против «лунный грунт» «смысл» против «переносный смысл»
д «датский и шведский» «читать и писать»	«швадский и детский» «питать и чесать»	«датский и шведский» против «шведский и датский» «читать и писать» против «писать и читать»
е «Выстирай белье и вымой посуду!» «Счастливо оставаться и будь осторожен!»	«Выстирай посуду...» «Счастливо осторожен...»	«Выстирай белье и вымой посуду» против «Вымой посуду и выстирай белье» «Счастливо оставаться и будь осторожен!» против «Будь осторожен! Счастливо оставаться!»
ж «Вам уже показали новую квартиру?» «Возьми там, где положил»	«Вам уже посмотрели новую квартиру?» «Возьми туда, где положил»	«Вам уже показали новую квартиру?» против «Вы уже посмотрели новую квартиру?» «Возьми там, где положил» против «Иди туда, где положил»

КОНФЛИКТЫ ПРИ ПРОДУЦИРОВАНИИ РЕЧИ — наиболее частый источник оговорок. Одни оговорки (а) отражают конфликт между формирующимся высказыванием и посторонними мыслями. Другие (б) — мысль, относящаяся к высказыванию, но не предназначенную для включения в него. Следующие группы оговорок связаны с явлениями конкуренции слов, которые потенциально могут быть включены в высказывание (в), колебаний относительно

употребления прилагательного при существительном (г), колебаний при выборе одного из двух возможных порядков слов. Еще один тип оговорок возникает из-за конфликта между двумя возможными способами построения последовательностей слов в высказывании (е). Последний тип оговорок (ж) возникает вследствие конкуренции двух возможных синтаксических конструкций.

менте, создавая предрасположение к оговорке таким образом, что предшествующие пары слов были семантически связаны с ожидаемой оговоркой.

До сих пор мы рассматривали речевые ошибки, возникающие из-за помех со стороны активизировавшихся единиц лексикона, которые говорящий не предполагает включить в сообщение. В простейшем случае — это конкуренция двух близких по значению слов, которые сливаются в одно, часто бессмысленное, слово: «Помоги мне разрезать мифштекс!». Такую оговорку довольно просто объяснить тем, что система продуцирования речи начинается с одного слова и затем переключается на другое. Но тогда возникает вопрос: почему произнесенное не состоит из части замещающего и всего замещившего слова целиком, например «мбифштекс»? Возможно, причина кроется в том, что фонетические замены подчиняются предписываемым языком правилам, согласно которым некоторые комбинации звуков в начале слова просто невозможны. Когда оговорки возникают в лабораторном эксперименте, звуковой состав произносимых слов действительно зависит от фонетической жизнеспособности конкурирующих сочетаний. Так, например, конкуренция между «шум» и «гром» может дать «шом», но никогда «шгром». В то же время конкуренция между «звук» и «стон» примерно с одинаковой вероятностью даст и «стук» и «звон».

Подобно тому как речевые ошибки возникают из-за колебаний при выборе отдельного слова, они могут возникнуть и из-за конкуренции последовательностей слов внутри одного сообщения. Прекрасный образец такой оговорки весьма оживил выступление одного политического деятеля в Колумбусе, шт. Огайо, в 1979 г. Призывая голосовать за своего кандидата, оратор заявил: «Он пропитан американским духом — как яблочный дом и отчий пирог». Очевидно, что, сознательно или нет, оратор имел в виду обе последовательности: «яблочный пирог и отчий дом» и «отчий дом и яблочный пирог». Конкуренция между двумя вариантами и привела к оговорке. Результатом аналогичного конфликта, скорее всего, являются и такие оговорки, как «брижка и стритье», возникающие из-за конкуренции между «стрижка и бритье» и «бритье и стрижка», или «соды-воки» из-за конкуренции «соки-воды» с «воды-соки». В пользу такого объяснения свидетельствуют результаты, полученные в эксперименте по модифицированной методике провоциро-

вания речевых ошибок. Вместо одного сигнала (звук зуммера), по которому испытуемый должен был произнести вслух читаемое им словосочетание, мы подавали два разных сигнала. По одному из них испытуемый должен был произнести слова в том порядке, в котором они предъявлялись на экране, а по другому — в обратном порядке. Например, испытуемый, делающий выбор между «нос и бровь» и «бровь и нос», мог сказать «брос и новь».

Существует много вариантов этой общей схемы конфликтов, приводящих к ошибкам. Наиболее обычным, однако, представляется адъективный конфликт, т.е. колебание относительно включения или исключения в высказывание прилагательного. Так, «Я жду тебя уже целый час» может быть результатом конфликта между «час» и «целый час». «Состный пуп» может происходить от «суп» и «постный суп», «точный сон» — из-за конфликта в выборе между «тон» и «сочный тон». Таким образом, многие оговорки, на первый взгляд представляющие собой только ошибки в переработке фонетической информации, являются скорее результатом конфликтов на лексическом уровне продуцирования речи — на уровне выбора слова. Более того, похоже, что существует общий принцип, согласно которому речевые ошибки на данном уровне языковой организации вызываются конфликтами между единицами более высокого уровня. Наши эксперименты показали, например, что конфликт на уровне формирования линейной структуры высказывания — скажем, при выборе между «Папа вымыл руки и вынул занозу» и «Папа вынул занозу и вымыл руки» — может привести к оговорке по типу перестановки слов: «Папа вынул руки и вымыл занозу».

Редко встречающиеся оговорки типа «Ты туда была вчера?» или «Спроси ему, когда там надо быть» тоже весьма информативны. Они примечательны тем, что ошибки в них носят явно синтаксический, а не лексический или фонетический характер. Одним из возможных объяснений таких оговорок является сбой в синтаксических правилах преобразования, по которым, согласно современной лингвистической теории, более сложное высказывание конструируется из простого исходного. Однако существует другое объяснение, не требующее сложных теоретических построений. Согласно нашей точке зрения, оговорка типа «Ты туда была вчера?» возникает из-за конкуренции двух

правильных и допустимых в языке конструкций. В данном случае ими могут быть «Ты туда ходила вчера?» и «Ты там была вчера?» Точно так же «Спроси ему, когда там надо быть» может быть результатом конфликта между «Спроси его, когда там надо быть» и «Спроси, когда ему там надо быть».

Я уверен также, что заданный мне однажды вопрос «Собаку уже поели?» возник из-за конфликта между «Собака уже поела?» и «Собаку уже покормили?» Нам с коллегами удалось экспериментально получить синтаксические оговорки этого типа при использовании ситуации с выбором двух синтаксически значимых высказываний, одновременно предъявлявшихся на экране терминала ЭВМ.

Интересно, что оговорки любых типов обнаруживают одну общую тенденцию: они как бы стремятся по своему удовлетворять требованиям системы языка. Например, оговорки, образующие настоящие слова естественного языка, встречаются намного чаще, чем бессмыслицы. «Чесать и питать» вместо «писать и читать» гораздо более вероятно, чем «члнить и пинить» вместо «пилить и чинить». Точно так же синтаксически приемлемые оговорки преобладают над синтаксически аномальными. Что же касается фонетических аномалий типа «мбифштекс», то они практически не встречаются. Почему система порождения речи стремится производить приемлемые с точки зрения языка высказывания? Оговорка неминуемо искажает речевое намерение говорящего — почему же тем не менее она должна представлять собой нечто принципиально допустимое языком? Очевидно, система продуцирования речи имеет какой-то «встроенный механизм», автоматически устраняющий практически любую аномальную конструкцию.

Мнения исследователей о том, как может работать такой механизм, разделились. Согласно одной точке зрения, лексикон с распространяющимися активациями сам обеспечивает автоматическую защиту от аномальных конструкций. Поскольку в лексикон входят только значимые единицы, маловероятно, чтобы активация внутри его создавала новые единицы, являющиеся аномальными. Такая точка зрения может соответствовать реальному положению вещей, если считать, что оговорка происходит до окончательного выбора единицы из лексикона. Согласно другому мнению, после отбора единицы, но до ее произнесения имеет место особый процесс контроля. Другими словами,

предстоящее высказывание «редактируется» на предмет языковой пригодности. Это предположение также имеет право на существование, в особенности если речевые ошибки действительно происходят после отбора единиц из лексикона.

Какое из этих двух объяснений точнее описывает процесс, с помощью которого системе порождения речи удастся в целом избегать аномальных конструкций? На этот вопрос пока нет ответа. Однако многие сторонники и той и другой гипотез сейчас переходят на средние позиции. В любом случае экспериментальные исследования речевых ошибок доказали, что система продуцирования речи имеет дело не только с выражением намерения говорящего в конкретном предложении. Она каким-то образом обеспечивает еще и лингвистическую значимость высказывания.

КДРУГИМ нерешенным проблемам относится вопрос о том, все ли речевые ошибки могут быть объяснены конфликтом выбора при формировании сообщения. Наши эксперименты, в которых оговорки специально вызывались запрограммированным конфликтом выбора, не отрицают существования оговорок другого типа. В самом деле, трудно представить, конфликты каких единиц могут привести к оговоркам типа «раконова» вместо «ракловина», «химический канал» вместо «химический катализ» и «физика твердого дела» вместо «физика твердого тела».

Возможно, что происхождение этих оговорок станет более ясным при изучении контекста, возможно нет. Во всяком случае очевидно, что поиск неизвестных пока источников некоторых оговорок — дело весьма перспективное.

Одна из характерных особенностей, отличающих человеческий язык от других форм биологической коммуникации, — это то, что в языке потенциально всегда имеется множество альтернативных вариантов для выражения некоторого смысла. Говорящему нет необходимости перебирать возможные варианты: выбор делается почти автоматически, фраза произносится безошибочно, единым духом. Исследователи речи пока далеки от понимания этого процесса. Для того чтобы продвинуться в этом понимании, необходимо воспользоваться одним общим, с нашей точки зрения, принципом: колебания в отношении выбора формы сообщения иногда приводят к оговоркам. Моделируя условия возникновения таких колебаний, мы надеемся еще многое узнать об уникальных свойствах человеческой речи.

Как улучшить «зрение» телескопа

В НАЦИОНАЛЬНОЙ солнечной обсерватории Сакраменто-Пик, шт. Нью-Мексико, прошло серию испытаний «корректирующее зеркало», которое позволяет с помощью наземного телескопа получать столь же резкие изображения, как и с телескопа, размещенного в открытом космосе. Это «зеркало» в действительности сложная система оптических и электронных элементов, которая «корректирует» свет, приходящий на зеркало обычного телескопа, устраняя те искажения изображения, которые обычно создаются за счет турбулентности в земной атмосфере.

Корректирующее зеркало, прошедшее проверку в шт. Нью-Мексико, — результат трехлетних исследований Р. Смитсона и его коллег из отдела солнечной и оптической физики исследовательской лаборатории фирмы «Lockheed» в Пало-Альто. Система разбивает мерцающее изображение, получаемое телескопом Сакраменто-Пик, на 19 изображений меньшего размера. После анализа каждого отдельного элементарного изображения система определяет, в какой мере атмосфера деформировала волновой фронт, и «восстанавливает» его правильную ориентацию. Затем все 19 исправленных изображений сводятся вместе на основном зеркале телескопа.

Во время недавних испытаний телескоп Сакраменто-Пик был направлен на активную область солнечного диска. Наблюдатели сообщили, что полученное изображение поверхности Солнца оказалось в пять раз резче нескорректированного изображения, полученного одновременно.

Это и другие корректирующие зеркала, находящиеся в стадии разработки, не рассматриваются как замена телескопов, предназначенных для установки на космических кораблях. Напротив, существует мнение, что телескопы, размещаемые в космосе, вскоре зарегистрируют новые явления, которые потребуют более детального изучения их с Земли.

В настоящее время для использования корректирующего зеркала необходимо, чтобы источник света был достаточно ярким. Исследователи надеются, что со временем корректирующие зеркала можно будет усовершенствовать настолько, чтобы наблюдать с их помощью звезды. Как показывают теоретические расчеты, источник света должен иметь порядок 12-й звездной величины. Послед-

ние эксперименты показали, однако, что корректирующая система способна «охватить» большее поле зрения, чем считалось ранее. Таким образом, если рядом с интересующим вас неярким объектом вы сможете найти звезду 12-й величины, скорректированное изображение объекта окажется тоже резким.

Виновна ли звезда

МНЕНИЕ, что взрывчатые процессы регулярно вызывали катастрофические последствия в биологической эволюции на Земле, получило широкое распространение немногим более года назад. Согласно наиболее популярной гипотезе, невидимая удаленная звезда — спутник Солнца, периодически отклоняет поток комет во внутреннюю область Солнечной системы; некоторые из этих комет сталкиваются с Землей, приводя к массовым вымираниям отдельных видов животных. Эта гипотеза Немезиды, названная так по имени гипотетической звезды, уже стала темой газетных статей — двух редакционных статей в «Нью-Йорк таймс» и репортажа в журнале «Тайм». Повторный анализ «ископаемых» данных показал, что регулярные вымирания отдельных видов животных, жертв Немезиды, возможно, никогда и не происходили.

Гипотеза Немезиды и другие теории явились откликом на более ранние и более скромные вопросы. В 1979 г. Л. Альварес, В. Альварес, Ф. Взаро и Э. Мишель из Калифорнийского университета в Беркли сообщили о том, что слои глины, отложенные в конце мелового периода (около 65 млн. лет назад) на территории Италии, Дании и Новой Зеландии, содержат аномально большое количество иридия. Иридий редко встречается в земной коре, но распространен в метеоритном веществе. Конец мелового периода был отмечен массовыми вымираниями, в том числе исчезновением динозавров. Исследователи предположили, что вымирания и отложение иридия были обусловлены одной причиной: падением на Землю космического тела, вероятно астероида, диаметром около 10 км. Обнаружение иридиевого слоя в других местах и находки в этом слое минералов, явно претерпевших изменение под воздействием тепла и удара, укрепили гипотезу о столкновении Земли с небесным телом, произошедшем в меловом периоде.

В конце 1983 г. Д. Рауп и Дж. Сеп-

коски из Чикагского университета, проанализировав стратиграфические данные по ископаемым морским организмам, дали гипотезе исследователей из Университета в Беркли новое развитие, побудив перейти от анализа единичного события к циклу катастроф. Для каждого стратиграфического яруса, соответствующего интервалу времени, на которые делятся последние 250 млн. лет, они определили скорость вымирания (число семейств, вымерших за данный отрезок времени, деленное на число существовавших семейств). Вычисленная скорость вымирания имела регулярный характер: через каждые 26 млн. лет происходили всплески. (Статистический анализ указывает также на более слабую цикличность с периодом в 30 млн. лет.) Рауп и Сепкоски предположили, что обнаруженная периодичность отражает повторяющиеся изменения в окружающей среде, которые, возможно, имели внеземную причину.

Астрономы и астрофизики довольно быстро «подобрали» подходящие механизмы. Согласно нескольким моделям, периодические массовые вымирания вызываются колебаниями Солнечной системы как целого относительно плоскости Галактики. М. Рампино и Р. Стотерс из Годдард-

ского центра НАСА высказали, например, предположение, что при прохождении через плоскость Галактики (которое происходит каждые 33 млн. лет) встреча с газопылевыми облаками приводит к возмущению траекторий комет, входящих в Солнечную систему, в результате чего одна или несколько из этих комет изменяют «свой курс» и сталкиваются с Землей.

Д. Уитмайер из Университета Юго-западной Луизианы и А. Джэксон из фирмы Computer Sciences Corporation и одновременно с ними М. Дейнис, А. Мюллер (оба из Университета в Беркли) и П. Хат из Института высших исследований в Принстоне, шт. Нью-Джерси, предложили модели, в которых периодичность вымираний отражает периодичность движения звезды — спутника Солнца. Эта звезда, которая, предположительно, имеет вытянутую орбиту, в настоящее время должна находиться на расстоянии нескольких световых лет от Солнца. Каждые 26 млн. лет, в момент наибольшего приближения к Солнцу, звезда должна проходить через плотную внутреннюю область облака Оорта, которое состоит из комет и, по-видимому, окружает Солнечную систему. Гравитационное притяжение Немезиды должно вызывать своего рода кометный душ. (На-

звание звезды было выбрано редактором журнала «Nature» из числа тех названий, которые предложили Мюллер и его коллеги.)

Предположение о периодических столкновениях получило подтверждение, когда было обнаружено, что регулярность в распределении больших ударных кратеров по возрастам согласуется с цикличностью вымираний, примерно с такой же регулярностью происходили, похоже, и другие геологические события — изменения магнитного поля Земли и тектонической активности. Предложенная гипотеза, однако, подверглась критике со стороны астрономов. Представляется, например, что плотность газопылевых облаков вблизи плоскости Галактики недостаточно велика для того, чтобы вызвать сильные возмущения в движении комет, «насаляющих» Солнечную систему, в тот момент, когда последняя пересекает плоскость Галактики. Что касается гипотезы Немезиды, то, по мнению некоторых исследователей, находясь на большом (как того требует модель) расстоянии от Солнца, звезда-спутник вряд ли оставалась бы «привязанной» к нему в течение времени, достаточно длительного, чтобы проявилось ее влияние на Земле в виде массовых вымираний животных.

В последнее время критика переключилась с моделей на те наблюдения, которые вызвали эти модели к жизни, т.е. на кажущуюся периодичность, зафиксированную в природе. В недавней статье, опубликованной в журнале «Nature», А. Хоффман из Колумбийского университета утверждает, что неопределенность в датировке ископаемых остатков и своего рода «направленность», отличающая методологию Раупа и Сепкоски, заставляют усомниться в правильности их выводов.

Хоффман указывает на то, что Рауп и Сепкоски сократили первоначальное число семейств, принятых к анализу (3500), до 567, исключив из рассмотрения те семейства, чье происхождение и вымирание нельзя «привязать» к одному интервалу времени, и те семейства, к которым относятся существующие до сих пор виды. Такая отбраковка данных уменьшила «шум» и неопределенность, возникающие вследствие того, что многие обнаруженные ископаемые классифицируются как сохранившиеся группы, в то время как они могут представлять морфологически сходные вымершие группы.

Из этого следует, что небольшие флуктуации скорости вымирания в ближайшие к нам интервалы времени увеличились бы за счет уменьшенного числа рассматриваемых семейств.



Кратер Маникуага в Квебеке диаметром 70 км — след кометного «дождя»?

Когда Хоффманом были учтены отброшенные семейства, многие резкие пики в скорости вымирания исчезли.

Оказалось также, что обнаруженная первоначально периодичность весьма чувствительна к тому, как выбирается геохронологический масштаб при абсолютной датировке отдельных стратиграфических ярусов. Если говорить о последних 250 млн. лет, то к датировке границ ярусов можно с равной вероятностью применить временные масштабы, различающиеся на 10 млн. лет и более. Выбор иного, чем был использован Раупом и Сепкоски, временного масштаба приводит к ослаблению цикличности с периодом 26 млн. лет.

Касаясь других сторон этой проблемы в статье, опубликованной в журнале «Geological Magazine», А. Хоффман и Дж. Гиолд из Университета шт. Луизиана высказывают предположение, что сам критерий, выбранный Раупом и Сепкоски для установления массового вымирания, «настроен» на то, чтобы создавать периодичность. Критерий не является количественным. На самом деле случаем массового вымирания считается локальный пик на кривой скорости вымирания, т.е. любой интервал, на котором эта скорость была выше, чем в предшествующий и последующий интервалы. Для оценки влияния такого критерия Хоффман и Гиолд применили его к гипотетической модели, в которой скорость вымирания семейств изменяется от яруса к ярусу случайным образом. Вероятность того, что для определенного яруса скорость вымирания окажется выше, чем для предшествующего яруса, равна одной второй; точно так же с вероятностью одна вторая эта скорость может быть выше, чем для последующего яруса. Таким образом, вероятность того, что данному интервалу времени соответствует локальный пик для скорости вымирания, равна одной четвертой.

Даже если скорость вымирания меняется случайным образом, в среднем один из четырех интервалов будет учитываться как эпизод массового вымирания. Масштаб времени, выбранный Раупом и Сепкоски, предполагает, что временные интервалы исследуемого ими периода охватывают в среднем 6,2 млн. лет каждый. Следовательно, утверждает Хоффман, критерий Раупа и Сепкоски массовых вымираний и выбранный ими временной масштаб делают неизбежным появление цикличности с периодом 26 млн. лет. Может быть, скорость вымирания действительно менялась периодически, но возможно, что такая регулярность есть лишь артефакт.

В последнем случае гипотеза Немезиды и другие подобные теории частичного утрачивают свое значение.

Рауп и Сепкоски остаются при своем мнении. Они проверили полученные результаты, «перетасовав» данные и проанализировав их на периодичность. Цикл с периодом 26 млн. лет при этом не появился; это свидетельствует, что указанная периодичность присутствует в реальных данных, а не была лишь следствием выбранного метода анализа. Позже они проанализировали все множество из 3500 семейств; при этом вновь была обнаружена периодичность с характерным периодом 26 млн. лет. Сепкоски обнаружил также регулярность в вымираниях на уровне родов (более мелких, чем семейства, таксономиче-

ских единиц). Оба новых результата должны быть вскоре опубликованы.

Аргументы Хоффмана не исключают вероятности того, что взнезменные причины оказывали влияние на развитие жизни на Земле, даже если и отказаться от предположения, что влияние звезд носит регулярный характер. Применяв различные статистические критерии к данным Раупа и Сепкоски, Хоффман обнаружил, что конец мелового периода бесспорно был отмечен массовым вымиранием. Ни с чем не сравнимый удар по биосфере, нанесенный в этот момент, и образование тогда же слоя, богатого иридием, продолжают оставаться сильным аргументом в пользу того, что конец господству динозавров был положен столкновением с небесным телом.

Издательство МИР предлагает:

Зенкевич О., Морган К. КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И АППРОКСИМАЦИЯ

Перевод с английского

Книга одного из крупных английских специалистов по современной теории и приложениям метода конечных элементов О. Зенкевича, написанная им совместно с его учеником и коллегой К. Морганом, служит введением в круг основных понятий численной аппроксимации, используемых при практическом решении дифференциальных задач. За основу изложения принят процесс Петрова — Галеркина, благодаря чему кроме методических достоинств удается показать существенное единство различных способов аппроксимации. Это позволяет читателю не только квалифицированно применять стандартные процедуры метода конечных элементов, но и более ясно понять достижения и цели современных исследований.

Книга написана с большим педагогическим мастерством. Простота и ясность изложения в

ней сочетаются с математической строгостью и высоким научным уровнем. Весь материал иллюстрируется на большом числе примеров. По замыслу авторов многочисленные упражнения, часть которых является заданием на программирование, должны занять значительную часть времени читателя и дать ему необходимый базис для последующего решения практических задач.

Для чтения книги достаточно знания математики в объеме вузовских программ инженерных специальностей с повышенной математической подготовкой. Она не требует предварительного знакомства с численными методами решения дифференциальных уравнений, что делает ее доступной многим читателям.

Для специалистов по вычислительной и прикладной математике, физиков, инженеров, студентов и аспирантов.

«Мир», 1986, 19 л. Цена 1 р. 70 к.



Наука вокруг нас

Какие силы определяют поведение капли воды, скользящей по оконному стеклу?

ДЖИРЛ УОЛКЕР

ОКОННОЕ стекло, по которому барабанит дождь, «отражает» две довольно тонкие проблемы физики жидкостей. Благодаря чему капли удерживаются на стекле? Что заставляет струйку воды, стекающую по оконному стеклу, искривляться и не дает ей течь прямо?

Прилипание капель часто объясняется действием поверхностного натяжения воды. Однако в том виде, в котором оно обычно рассматривается, поверхностное натяжение не может

объяснить этот эффект. Точно так же искривление струйки воды (меандрирование) часто связывают с загрязнением стекла. Но едва ли грязь на стекле может объяснить регулярный характер меандрирования.

Представим себе капельку воды на твердой горизонтальной плоскости, например на стекле. Если капля не растекается по плоскости, образуя тонкую пленку, то она принимает форму слегка сплюсненной полусферы. Форма капли частично определя-

ется взаимным притяжением молекул: эти силы стремятся свести к минимуму площадь поверхности капли. Саму же поверхность можно считать растянутой эластичной пленкой.

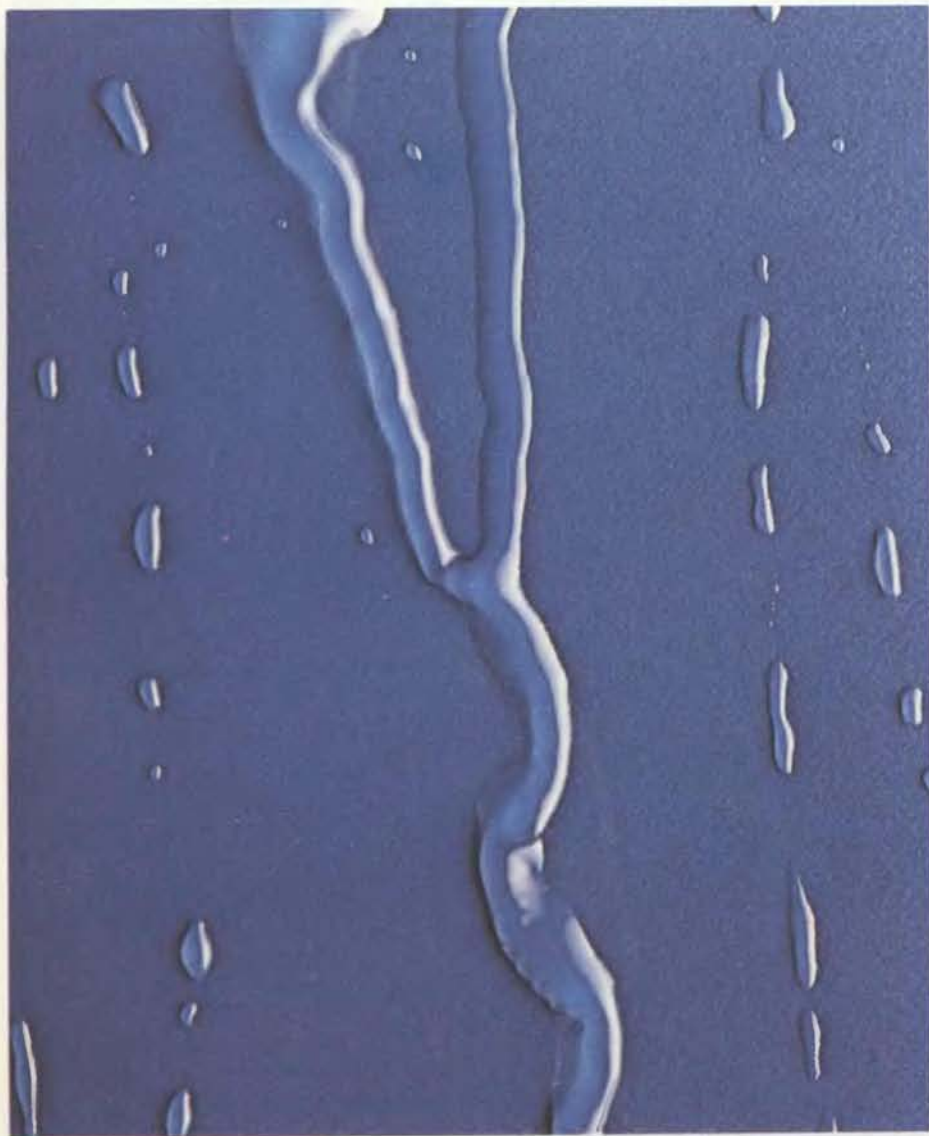
Это стремление к минимизации площади принято описывать в терминах сил натяжения, действующих на поверхность капли. Вообразим некоторую линию на этой поверхности. Поверхностное натяжение можно изобразить в виде сил, направленных в разные стороны перпендикулярно этой линии и растягивающих поверхность вдоль этой линии. Величина поверхностного натяжения определяется как отношение силы, «тянущей» линию в одну сторону, к длине этой линии.

Границу области, где капля соприкасается с твердой плоскостью, называют линией раздела трех фаз, поскольку здесь встречаются вода, воздух и твердое тело. Угол между каплей и твердой поверхностью на линии раздела трех фаз называется углом смачивания. Он определяется как угол между твердой плоскостью и плоскостью, касательной к капле. Если угол смачивания меньше 90° , капля частично растекается по твердой поверхности: говорят, что она смачивает поверхность. Если угол смачивания больше 90° , капля стягивается в шарик и не смачивает поверхность.

В первой половине XIX в. Т. Юнг, известный своими оригинальными работами по оптической интерференции, высказал предположение, что угол смачивания устанавливается в процессе стремления к равновесию трех сил натяжения, действующих на линии раздела трех фаз. Взаимодействие между твердой плоскостью и водой приводит к возникновению силы, действующей вдоль поверхности раздела между водой и твердым веществом; это межфазное натяжение. Сила натяжения в твердом веществе действует в противоположном направлении. Сила поверхностного натяжения воды направлена по касательной к поверхности воды.

Величина горизонтальной составляющей силы поверхностного натяжения воды определяется косинусом угла смачивания. Если линия раздела трех фаз находится в равновесии (капля не растекается и не сжимается), то, в соответствии с рассуждениями Юнга, полная горизонтальная сила, действующая на этой линии, должна быть равна нулю. Благодаря определенной величине угла смачивания горизонтальные составляющие всех сил на этой линии уравниваются друг друга.

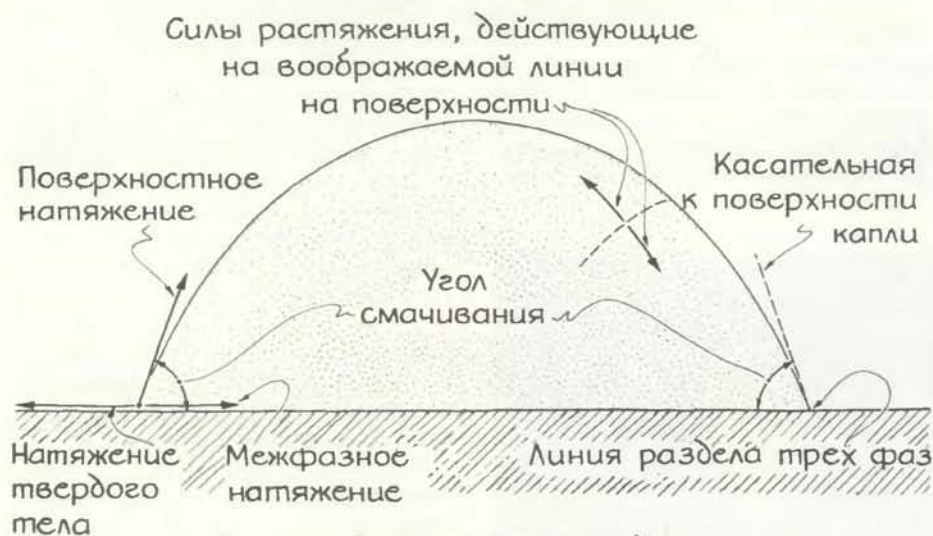
Рассуждения Юнга просты, но экспериментально никак не проверя-



Капли воды и меандр на листе плексигласа



Форма покоящейся капли



Силы, действующие на каплю воды

лись. Измерения углов смачивания между каплей и твердой плоскостью, проведенные разными исследователями, не согласуются между собой. Таким образом, правильность теории Юнга остается под вопросом. На самом деле тот очевидный факт, что капли дождя удерживаются на оконном стекле, свидетельствует против теории.

Один из изъянов теории — это то, что до сих пор никто не смог показать, каким образом твердая плоскость может находиться в состоянии натяжения в смысле высказывания Юнга. Идеи о взаимодействии твердого вещества и воды, а также твердого вещества и воздуха лишаются, таким образом, почвы наряду с предположением о существовании линии раздела трех фаз. В более совершенной модели можно было бы рассматривать трехмерную область, где форма поверхности воды в пределах нескольких молекулярных расстояний от твердой плоскости совершенно отличается от той формы, которая наблюдается в простых опытах.

Легко продемонстрировать ошибочность теории Юнга, капнув каплю

воды на чистое стекло, лежащее горизонтально. Согласно теории, капля находится в равновесии и потому угол смачивания должен иметь определенное значение. Если теперь с помощью шприца добавить в каплю немного воды, размер капли увеличится, но линия раздела трех фаз не сдвинется. Угол смачивания в этом случае увеличится, что противоречит теории Юнга. Аналогичным образом можно удалить часть воды из капли, так что угол смачивания уменьшится, а линия раздела трех фаз останется на месте, что опять-таки противоречит теории.

Очевидно, что равновесие капли достигается не при каком-то одном значении угла смачивания, а при некотором множестве этих значений. Капля начинает растекаться только в том случае, когда угол смачивания становится больше некоторого наибольшего предельного угла. Капля сжимается, когда угол смачивания становится меньше некоторого наименьшего предельного угла. Если то или другое произошло, величина нового угла смачивания вновь попадает в диапазон значений, отвечающий состоянию равновесия. Верхний предел угла сма-

чивания назовем углом продвижения, нижний — углом отступления. Способность капли находиться в состоянии равновесия при различных углах смачивания называют гистерезисом смачивания. Гистерезис (в переводе с греческого «запаздывание». — *Перев.*) отвечает ситуации, когда силы, действующие на тело, меняются, а эффект их воздействия запаздывает.

Именно явление гистерезиса позволяет капле удерживаться на наклонной плоскости, в том числе на вертикальном оконном стекле. Наклоните стекло, на которое вы предварительно капнули каплю воды. (Наклон должен быть меньше того, при котором вся капля скользит вниз.) Верхняя часть капли останется на месте, а нижняя несколько сползет. Угол смачивания в этом случае станет меньше в верхней части капли и больше в нижней ее части. Если бы равновесие достигалось лишь при одном значении угла смачивания, капля немедленно соскользнула бы вниз.

В чем причина явления гистерезиса? На этот вопрос пытаются ответить исследователи. Один из факторов — это шероховатость поверхности, на которой находится капля. Даже стекло оказывается шероховатым, если рассматривать его под микроскопом. Линия раздела трех фаз, как считают некоторые исследователи, проходит по возвышенностям и углублениям на поверхности. Вполне возможно, что угол смачивания на самом деле имеет одно определенное значение и что микроскопические наклоны поверхности изменяют лишь видимый угол смачивания.

Неоднозначность угла смачивания может быть связана также с микроскопическими неоднородностями состава твердого вещества. Поглощенные поверхностью примеси и другие загрязнения тоже могут быть причастны к явлению неоднозначности угла смачивания. В ряде случаев линия раздела трех фаз, может, и движется в действительности, но так медленно, что глазу это движение незаметно.

Если наклонить стекло достаточно сильно, то капля начнет скользить вниз. Усилия многих исследователей были направлены на то, чтобы определить условия, при которых начинается это движение. В ряде случаев при опрыскивании листья химикатами, например, требуется, чтобы капля удерживалась на плоскости, даже если та сильно наклонена. В других случаях надо, чтобы капли скатывались с плоскости, оставляя ее сухой.

Каков максимальный (для капли данного размера) наклон плоскости, при котором капля удерживается на этой плоскости? И наоборот: каков



Диапазон изменения угла смачивания

Кажущиеся углы смачивания на микроскопически неровной поверхности

максимальный размер капли, удерживаемой на плоскости с данным наклоном?

Предположим, стекло наклонено настолько, что еще немного и капля соскользнет. Сила, тянущая каплю вниз, — это составляющая силы тяжести, параллельная стеклу. Сила, которая препятствует скольжению, обусловлена поверхностным натяжением воды. В простейшей модели сила, препятствующая скольжению, равна произведению величины поверхностного натяжения на поперечный размер капли. С увеличением наклона стекла составляющая силы тяжести возрастает, пока не превысит силу, обусловленную поверхностным натяжением; в этот момент капля начнет соскльзывать по стеклу.

Согласно другим простым модельным рассуждениям, капля скатывается в тот момент, когда под действием составляющей силы тяжести угол смачивания в нижней части капли достигает угла продвижения. Для описания противодействия скольжению были придуманы и другие, более сложные модели, в которых учитываются углы смачивания в верхней и нижней частях капли.

Я наблюдал за поведением капель воды на листе плексигласа. Вода бралась из крана; и вода, и плексиглас были, конечно, загрязнены. Когда лист лежал горизонтально, капля имела форму шарика. Если я наклонял плексиглас, нижняя часть капли слегка сползала и ширина капли уменьшалась. Если я продолжал и дальше наклонять плексиглас, капля соскальзывала и двигалась вниз, оставляя на листе тонкий след воды.

Лист я наклонял так, что некоторые капли скользили достаточно медленно и их можно было рассматривать через увеличительное стекло. Обнаружилось, что скольжение представляет собой последовательность коротких рывков. В ряде случаев были заметны узкие «пальцы», которые вырывались вперед. Непонятно было, за счет чего они образуются. Когда

я пускал каплю по грязному пятну и даже по волосу, «пальцы» не возникали. Возможно, появление «пальцев» и резкие рывки капли объясняются микроскопическими загрязнениями или крошечными неоднородностями поверхности плексигласа.

Вторая упомянутая мною проблема связана с искривлением (или меандрированием) струйки воды. Казалось бы, если вода стекает по наклонной плоскости под действием силы тяжести, она должна двигаться по прямой. Однако во многих случаях струйка меандрирует, так что образуются «излучины», соединяющие относительно прямые отрезки, которые смещены к одной или другой стороне листа.

Меандры могут оставаться устойчивыми в течение нескольких часов, а могут изменяться так быстро, что струйка извивается как змея. Каковы причины меандрирования?

По-видимому, многие вопросы, связанные с этой проблемой, решены недавно Т. Накагавай из Университета Канабавы в Японии и Дж. Скоттом, работавшим в Университете Эссекса. Эти исследователи пускали струйку воды по ровному плексигласовому листу длиной 1 м и шириной 0,6 м. Снизу под лист подкладывалась масштабная сетка. Наклон листа можно было менять от 5 до 85° с интервалом в 5°. Вода вытекала из бака через виниловую трубку с внутренним диаметром 1 см.

Измерив длину струйки, Накагава и Скотт вычисляли ее «извилистость», т.е. отношение ее действительной длины к длине неискривленной струйки. Толщина струйки измерялась с помощью иглы через каждые 5 мм вниз по течению и через 1 мм поперек струйки. По этим данным определялось поперечное сечение струйки.

Струйка, в которой не было заметно турбулентных завихрений, истекала из трубки в 20 см от верхнего края плексигласа. Чтобы сделать видимой структуру течения, в струйку с помощью иглы для подкожных инъек-

ций вводился краситель (раствор метиленового синего). Расход воды поддерживался постоянным благодаря неизменному уровню воды в баке. Расход определялся следующим образом: в течение фиксированного времени вода собиралась в нижней части плексигласа и затем взвешивалась. После каждого опыта плексигласовый лист протирался сухой тряпкой и просушивался в течение 30 мин.

Я взялся повторить эти опыты и изготовил аналогичное устройство. Купленный в магазине лист плексигласа я прикрепил к твердой деревянной доске, так чтобы лист не изгибался. Верхний край доски опирался на два лабораторных штатива, с помощью которых можно было менять наклон плексигласа. Наклон я измерял с помощью угломера, прикрепив к нему небольшой груз на пружине, чтобы он давал правильное направление вертикали.

В ряде опытов я использовал сточный желоб (из тех, что устанавливаются на крышах), укрепив его у нижнего края плексигласа. Вода бежала по желобу и вытекала через отверстие, которое в обычных условиях ведет в водосточную трубу. Измеряя скорость наполнения мензурки, стоящей под отверстием, я определял расход (объем воды, протекающей через данное сечение за секунду).



Капля, находящаяся в равновесии

Над плексигласовым листом возвышался большой сосуд, в который через садовый шланг непрерывно подавалась вода. К стеклянной трубке, отходящей сбоку от сосуда, подсоединялась пластиковая трубка, другой конец которой укреплялся на плексигласе так, чтобы отверстие смотрело вниз по склону. Вода в сосуд подавалась в избыточном количестве и переливалась через края, для того чтобы напор воды, вытекающей из трубки на плексиглас, оставался постоянным. (Свои опыты я проводил во дворе, но для них подошло бы и помещение, где имеется слив.) Сосуд устанавливался на лабораторном штативе; поднимая или опуская штатив, можно было менять высоту сосуда и благодаря этому расход струйки.

Накагава и Скотт обнаружили, что при наклоне плексигласа более 30° устойчивый меандр образовывался в том случае, когда величина расхода находилась между определенными верхним и нижним значениями. Если величина расхода превышала верхний предел, меандр был неустойчив и изменял свою форму. Если величина

расхода была меньше нижнего предела, струйка разбивалась на отдельные капли, которые скользили друг за другом вниз по листу. Если же величина расхода попадала в интервал между верхним и нижним пределами, меандр возникал обязательно.

По мере увеличения наклона плексигласа величина верхнего предела уменьшалась и диапазон расходов, при которых возникал устойчивый меандр, сужался. При наклонах, меньших 30° , исчезал нижний предел: меандр оставался стабильным, как бы ни была мала скорость струйки. Извилистость росла как с увеличением наклона плексигласа, так и с увеличением расхода.

Для определения скорости струйки Накагава и Скотт измеряли площадь ее поперечного сечения. Определить таким способом скорость оказывается возможным потому, что расход равен площади поперечного сечения, умноженной на скорость воды, протекающей через это сечение. Непрерывность течения предполагает, что расход должен быть одинаков по всей длине струйки и, значит, скорость те-

чения должна меняться обратно пропорционально площади ее поперечного сечения. Так, например, если бы струйка стекала прямо вниз по листу, ускоряясь под действием силы тяжести, она с расстоянием становилась бы уже. (В действительности через 10 см вниз по течению вязкие силы, обусловленные силой трения о плексиглас, препятствуют дальнейшему ускорению струйки и поперечное сечение становится постоянным.)

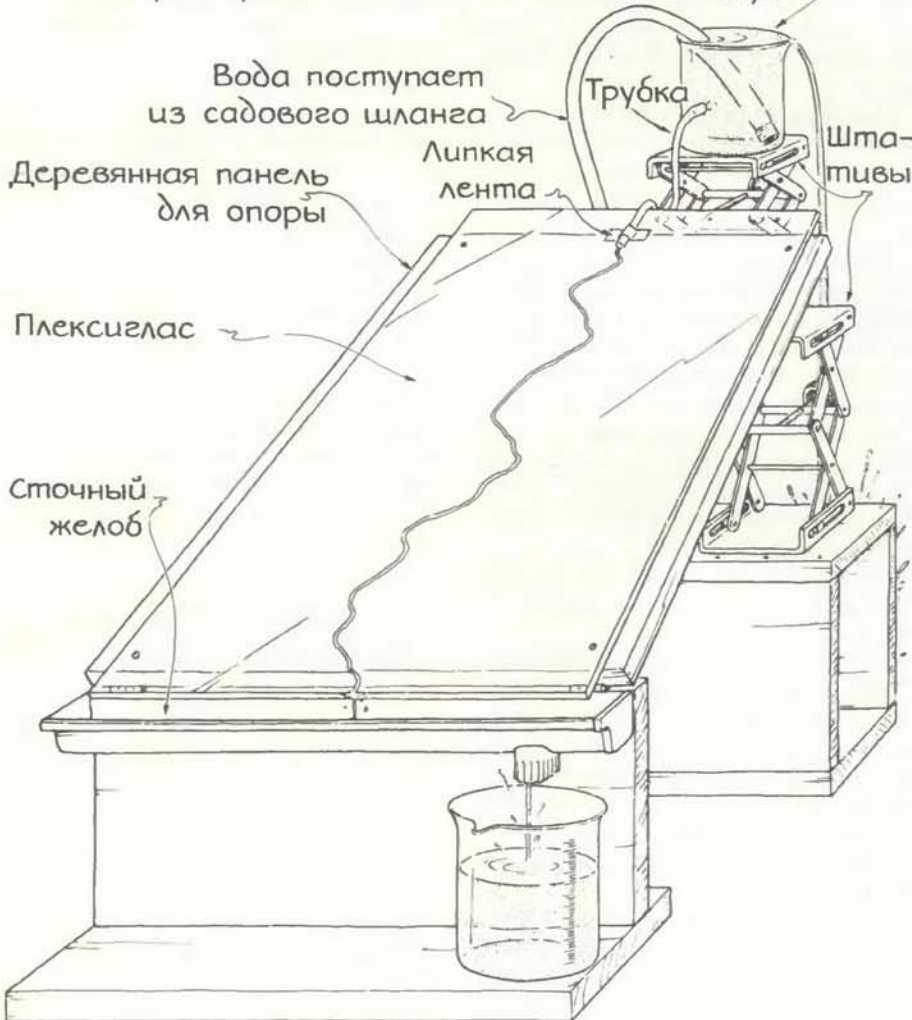
Накагава и Скотт опубликовали данные по определению площади и формы поперечного сечения струйки, образующей устойчивый меандр. На протяжении первых 7 см от выходной трубки струйка текла практически прямо вниз, постепенно сужаясь; ее поперечное сечение оставалось при этом симметричным, так что наиболее высокая точка в нем располагалась на оси симметрии. Ниже по течению струйка образовывала несколько меандров. Излучины соединяли относительно прямые отрезки, наклоненные к одному или другому краю плексигласа (назовем эти отрезки диагоналями). В меандре площадь поперечного сечения изменялась: непосредственно перед излучиной она была больше, а в самой излучине — меньше. Следовательно, перед излучиной течение было медленным, а в излучине — быстрым.

Поперечное сечение меандра было асимметричным: самая высокая точка находилась не по центру струйки. Более «глубокую» сторону струйки я буду называть хребтом. На диагоналях хребет располагался на той стороне струйки, которая была ниже на плоскости. У начала излучины хребет пересекал струйку: вначале он шел по внешней стороне излучины, затем переходил на нижележащую сторону следующей за излучиной диагонали.

Накагава и Скотт разделяют мнение, что хребет служит причиной образования меандров. В струйке, поперечное сечение которой симметрично, силы поверхностного натяжения, действующие на противоположные стороны, взаимно компенсируют друг друга. Если же поперечное сечение не симметрично, то силы, действующие на хребте, больше сил, действующих на противоположной стороне. Этот разбаланс и приводит к появлению результирующей силы, направленной от хребта к более «мелкой» стороне струйки.

Хребет появляется уже в том месте, где струйка течет более или менее прямо, изливаясь из трубки. Возможно, он возникает как следствие загрязнения или шероховатости листа или турбулентности, которая не заметна для невооруженного глаза. Результирующая сила, направленная от хреб-

Вода, перетекающая через край, постоянно заполняет сосуд



Домашняя установка для наблюдения за меандрами

та, отклоняет струйку, которая течет по первой диагонали меандра.

Этот прямолинейный участок оканчивается устойчивым по отношению к тянущей его вниз силе тяжести благодаря тому, что хребет здесь находится внизу, и результирующая сила направлена вверх по плоскости. Ситуация аналогична той, что имеет место, когда капля удерживается на наклонной плоскости благодаря результирующей силе поверхностного натяжения. Как и в случае с каплей, угол смачивания больше на нижней стороне и меньше на верхней стороне струйки.

Вода, текущая по диагонали, ускоряется под действием силы тяжести в меньшей степени, чем вода, текущая прямо вниз. Сила трения, действующая со стороны плексигласа, замедляет течение, в результате чего возрастают площадь поперечного сечения струйки и угол смачивания на ее нижней стороне. Непосредственно перед излучиной угол смачивания оказывается больше угла продвижения, и вода начинает течь прямо вниз по плоскости.

Если бы не хребет, струйка продолжала бы течь вниз. Однако уже в начале направленного вниз отрезка хребет пересекает ее. Силы, обусловленные существованием хребта, отклоняют струйку и направляют воду по другой диагонали. Место поворота и является излучиной меандра.

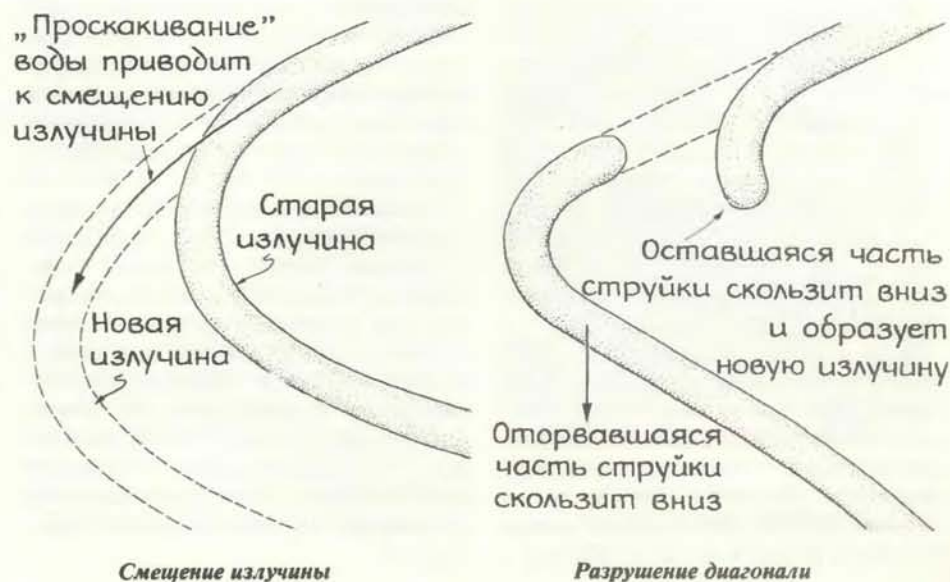
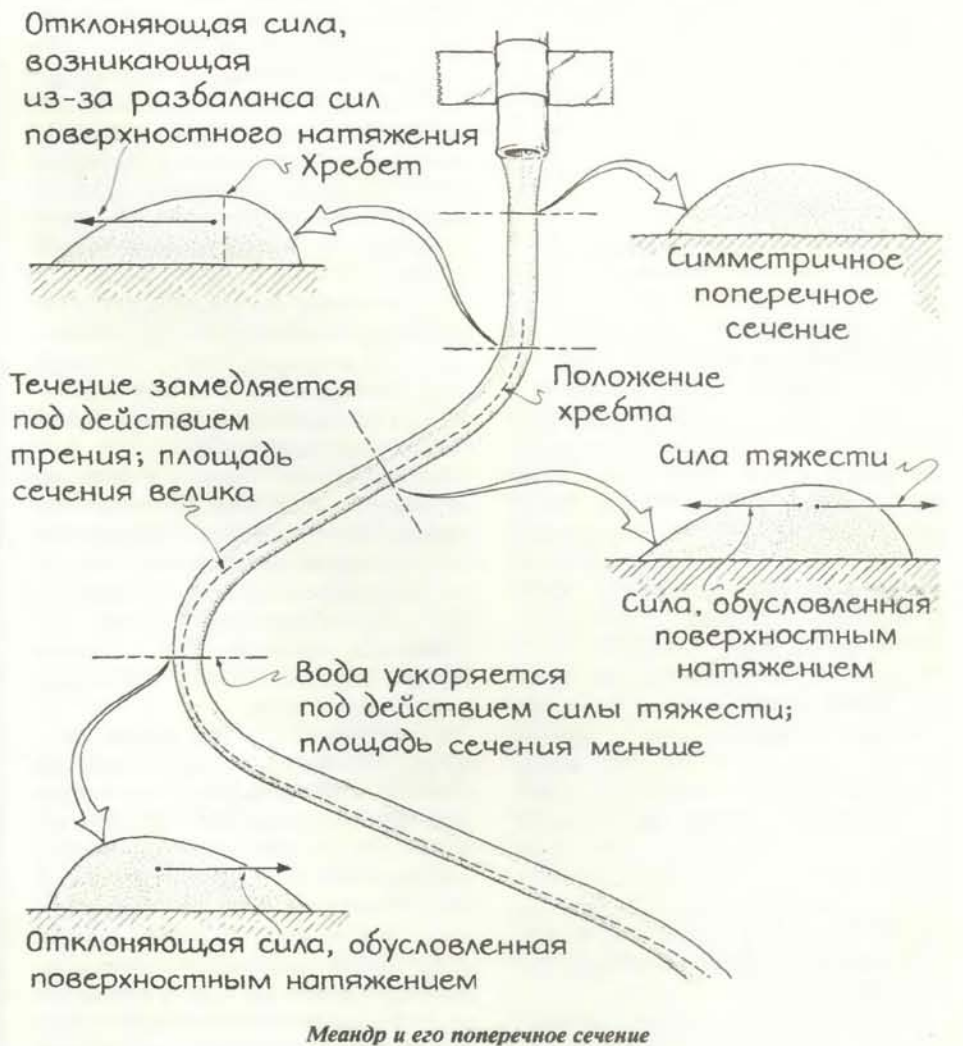
В своих опытах я отметил еще несколько особенностей движения воды по наклонной плоскости. Капли, как правило, скользили вниз по не слишком сильно искривленной или по прямой траектории. Аналогичным образом струя с малым расходом часто тоже искривлялась незначительно. Если в верхней части плоскости наблюдались большие меандры, то в нижней части они могли быть незаметными. Однажды я наблюдал струю, которая сильно петляла в верхней части плексигласа, слабо — в нижней, а между меандрами текла по прямой. Как объяснить это явление?

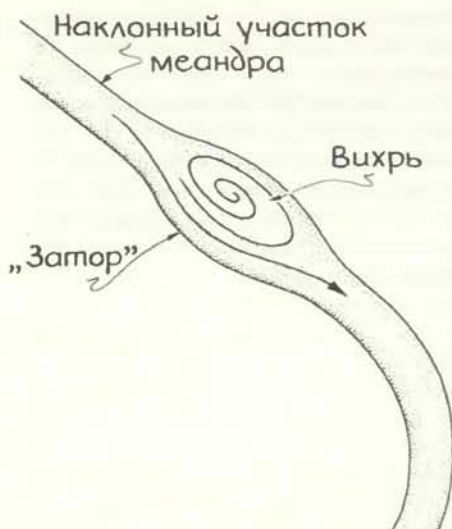
Я думаю, в скользящей вниз капле с асимметричным поперечным сечением силы, возникающие вследствие асимметрии, быстро восстанавливают симметричную форму капли. Капля моментально отклоняется в сторону, но двигается по этому наклонному пути не долго. Поскольку масса капли меньше массы струйки, на нее сильнее должны влиять загрязнение и неоднородность поверхности, по которой она скользит. В результате и образуется волнистая траектория.

Рисунок, который образует струйка с небольшим расходом, сильно зависит, на мой взгляд, от начального течения по прямой. Пустив такую

струйку, я затем прерывал ее, помещая вблизи отверстия трубки кусок ткани. Каждый раз, когда я убирал ткань, струйка образовывала иной рисунок: иногда возникал большой меандр, иногда маленький, а в некоторых случаях меандров не было совсем. Форма струйки зависела, похоже, от характера течения выше куска ткани в тот момент, когда я эту ткань

убирал. Если на начальном прямом отрезке струйки хребта не было, то струйка меандрировала слабо; если же имелся хребет или была заметна турбулентность, возникал ярко выраженный меандр. Отрезок, по которому вначале текла вниз вода, сохранялся, указывая на то, что начальная крайняя область листа определяла направление течения.





Течение внутри «затора»

Во многих опытах я вначале пускал струйки с малым расходом, слабо меандрирующие. По мере увеличения расхода первый меандр сдвигался вниз по плоскости, вероятно вследствие того, что силе, обусловленной существованием хребта, нужно было больше времени, чтобы отклонить струйку. Вся струйка также начинала изменять форму: возникали более выраженные меандры с более длинными диагоналями и с большими расстояниями по склону между излучинами. Такой рисунок струйки можно объяснить, рассматривая течение внутри хребта на диагоналях. Вода, приближающаяся к излучине, «проскакивает» ее до того, как начинает падать вдоль плоскости. Если такое «проскакивание» сохраняется в течение некоторого времени, излучина начинает смещаться по плоскости вниз и в сторону, благодаря чему диагонали удлиняются.

Спустя некоторое время диагональ, идущая к излучине, начинает скользить вниз по плоскости, поскольку трение в ней замедляет течение, вызывая увеличение площади поперечного сечения, а значит, и угла смачивания. Когда угол смачивания становится равным углу продвижения, диагональ начинает скользить вниз. Если она скользит быстрее, чем излучина, то отрывается от последней и образует новую излучину ближе к середине листа. Как только старая излучина разрывается, вода в ней начинает быстро скользить вниз по листу.

Если я продолжал повышать расход, струйка начинала разрушаться, причем зачастую на диагоналях; иногда от нее отрывалась не только старая излучина, но и несколько отрезков диагонали. «Неповрежденная» часть струйки быстро образовывала новую излучину, которая могла погибнуть в

ту же сторону, что и прежняя, или в другую. Быстрое изгибание струи и отрыв от нее «кусочков» создавали впечатление, что основная часть струи всею разбрызгивает воду.

В одном из опытов, где мне удалось получить устойчивый меандр, я с помощью шприца ввел в струйку пищевой краситель. В отсутствие краски устойчивость меандра создавала впечатление неторопливости течения. Подкрашивание воды показало, насколько быстро течет вода.

Вскоре, после того как я ввел краситель, струйка вновь очистилась; исключение составили верхние стороны диагоналей. Там краситель держался на несколько секунд дольше, показывая, что течение там слабее, чем внутри хребта на нижней стороне диагоналей.

После этого я попробовал добавлять краситель с постоянной скоростью. Там, где течение было сильным, краска размывалась и не была заметна, но в тех местах, где течение замедлялось, она была видна.

Во время этого опыта я обратил внимание еще на одну любопытную особенность меандров. Временами струйка образовывала области утолщения, которые я назвал «заторами». Некоторое время такой затор мог оставаться неподвижным, а затем сползал по струйке, часто заставляя меандр изгибаться.

С помощью увеличительного стекла я рассмотрел, как движется краска в заторе. Обнаружилось, что у верхней стороны утолщения вода образует завихрение: нити красителя накручивались вокруг центра, двигаясь и вверх и вниз по течению. Благодаря этому наблюдению я понял, почему затор заставляет меандр изгибаться. Наличие вихря у верхней стороны затора вынуждает воду у нижней стороны двигаться быстрее и увеличивает интенсивность турбулентности. Угол смачивания на нижней стороне при этом возрастает и становится больше угла продвижения, что ведет к разрушению. Вихрь также может резко увеличиться, что приведет к разрыву течения на диагонали и отклонению потока вниз.

Дальнейшие наблюдения за скользящими каплями и меандрирующими струйками могут дать много пищи для размышлений. Интересно, например, как изменятся описанные мною явления, если добавить в воду спирт. (Спирт уменьшает поверхностное натяжение.) Меандрируют ли вязкие жидкости, такие как охлажденный сироп? Увеличивается или уменьшается интенсивность меандрирования, если увеличивается шероховатость плоскости?

Издательство
МИР
предлагает:

Ч. Сеттерфилд
ПРАКТИЧЕСКИЙ КУРС
ГЕТЕРОГЕННОГО
КАТАЛИЗА

Перевод с английского

В книге основное внимание уделено тем катализаторам и таким реакциям, которые имеют промышленное значение. Большой опыт лектора и широкая эрудиция позволили автору — профессору Массачусетского технологического института — в лаконичной форме изложить обширные данные о катализе, основных типах катализаторов, крупнотоннажных каталитических процессах.

В гл. 1 даны основные понятия и определения, а также краткий очерк развития гетерогенного катализа. В гл. 2 охарактеризована адсорбция, изотермы и теплоты адсорбции. Гл. 3 посвящена скоростям и кинетическим моделям каталитических реакций. В гл. 4 рассматриваются приготовление и производство катализаторов. Гл. 5 и 6 посвящены двум распространенным типам гетерогенных катализаторов: металлам на носителях и катализаторам кислотной природы. В гл. 7 дается характеристика типов кислотных центров алюмосиликатных катализаторов. Гл. 8—10 посвящены следующим группам каталитических производств: окислению, переработке нефти и углеводородов, синтезу на основе CO и водорода. В гл. 11 описаны методы испытаний катализаторов на лабораторных и опытных установках.

Для химиков широкого профиля — работников научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий, студентов химико-технологических вузов.

1984, 36 л.
Цена 5 р. 70 к.



Занимательный компьютер

О том, когда игру можно считать работой, и о неопасных терминальных болезнях

А.К. ДЬЮДНИ

В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ центре фирмы Bell Laboratories в Мюррей-Хилл (шт. Нью-Джерси) невозможно провести грань между работой и игрой. Время от времени безудержная фантазия и удивительная изобретательность сотрудников центра порождают игры, имеющие весьма серьезное значение. Показательные в этом смысле примеры дают терминал типа Блит (Blit) и развлекательная программа КРАБЫ (CRABS), которая иногда мешает работать с системой Блит.

Разработанная четыре года назад Р. Пайком и Б. Локанти, система Блит представляла собой предварительную версию нового терминала DMD 5620 фирмы Teletype Corporation. Система фирмы Teletype и ее прообраз Блит представляют собой терминалы, работающие в многопрограммном режиме.

Когда прошлой осенью я посетил исследовательский центр в Мюррей-Хилл, Пайк предложил мне посмотреть терминал DMD 5620 в действии. На терминалах этого типа (которые я ниже буду просто называть терминалами Блит) экран может быть поделен на отдельные окна, иногда частично перекрывающиеся. Каждое окно, по существу, представляет собой самостоятельный миниатюрный экран, полностью отданный в распоряжение какой-либо одной программы. Программы могут выполняться встроенным в терминал микропроцессором или большой центральной ЭВМ, к которой подключен терминал. При этом незанятые области экрана покрываются точечным узором, как бы окрашивающим их в серый цвет.

На экране терминала, показанного мне Пайком, три окна были заняты тремя одновременно выполняющимися программами. Одно окно принадлежало находящейся в стадии отладки экспериментальной программе редактирования текстов. Во втором окне программа-редактор показывала текст первой программы. Третье окно было отведено программе отладки, при помощи которой осуществлялась проверка экспериментальной программы редактирования текстов. Все три программы выполнялись

встроенным в терминал Блит микропроцессором. Пайк демонстрировал передо мной необычайные возможности этой многопрограммной системы, как вдруг в верхней части экрана появилось несколько крабовидных символов, разбросанных вдоль границы окна. «Крабы» двигались по экрану, как бы поедая изображение в окне. Заметив мое удивление, Пайк объяснил: «Это крабы. Чтобы вас позабавить, мы только что загрузили программу КРАБЫ из центральной машины».

Центральная машина, к которой был подключен терминал Блит, работала под управлением операционной системы UNIX. Одна из наиболее популярных операционных систем за всю историю вычислительной техники, система UNIX, была создана К. Томпсоном, сотрудником фирмы Bell Laboratories, разделившим премию Тьюринга за 1983 г. со своим коллегой из центра в Мюррей-Хилл Д. Ритчи.

Завороженный, я наблюдал, как крабы (их было около тридцати) съели линию, ограничивающую одно из окон, и начали поедать текст внутри. «Как их можно остановить?» — спросил я. «Никак», — ответил Пайк. «Да, но ведь вы их каким-то образом останавливаете?»

Программа КРАБЫ, написанная Л. Карделли и М. Манэссе в 1982 г., — это преднамеренное нарушение соглашений, принятых в многопрограммной системе, с которой работает терминал Блит. Дело в том, что каждая программа, имеющая свое окно на экране, должна быть независимой от программ из других окон и защищенной от них. Когда терминалы системы Блит были расставлены по помещениям лабораторий, Карделли и Манэссе не смогли удержаться от соблазна нарушить эти соглашения.

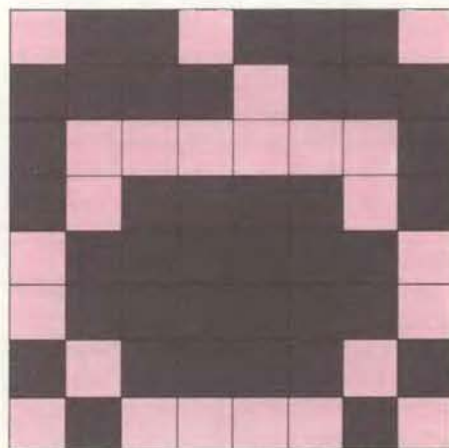
К тому времени, как Пайк поведал мне эту историю, все окна на экране были уже изрядно поедены. Они напоминали страницы недавно найденной средневековой рукописи. Текст в окнах стал настолько неразборчивым, что Пайк уже не мог объяснить мне, как протекает процесс выполнения соответствующих программ.

Пайк рассказал, что название этого

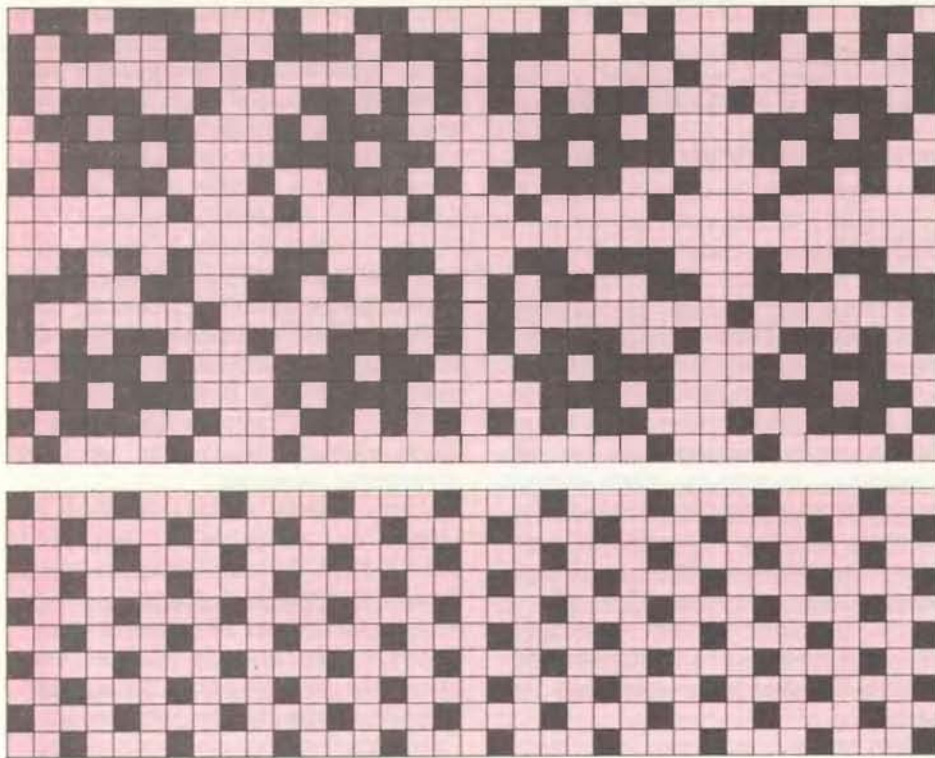
оригинального терминала произошло от имени графической процедуры низкого уровня bitblt, отличающейся удивительно широким спектром применения. Имя bitblt в свою очередь является сокращением от слов bit — boundary block transfer (букв. перенос блоков с битовой границей. — *Перев.*), обозначающих процедуру, которая управляет перемещением информации по памяти терминала. Точнее говоря, bitblt переносит содержимое одной прямоугольной области памяти в другую. В ходе этого переноса над содержимым области могут производиться некоторые простые логические операции.

Часть памяти терминала Блит состоит из подсистемы емкостью 100 000 байт, целиком отведенной для экрана. В процессе непрерывного сканирования каждый бит памяти преобразуется в светлую или темную точку на экране дисплея. При этом одномерный массив памяти преобразуется в двумерное изображение содержимого массива. Поскольку область памяти и ее изображение имеют различные размерности, точки, принадлежащие прямоугольной области на экране, оказываются разбросанными по памяти в виде отдельных блоков ячеек с последовательными адресами, так что каждый блок соответствует одной горизонтальной линии (полоске) на экране, из которых состоит прямоугольник. Совокупность точек ячеек во всех блоках образует прямоугольное множество. Процедура bitblt позволяет выполнять определенные операции над такими прямоугольными множествами.

Для успешной работы в многопрограммной среде терминал Блит требует также значительного объема основной, «неэкранный» памяти, необходимой программам, диалог с которыми проходит с использованием экрана терминала. Например, в тер-



Изображение краба
на квадратной решетке



Битовые карты краба со светлыми точками, нанесенными на них в соответствии с восемью возможными способами наложения краба на серое поле

минале DMD 5620 фирмы Teletype для этой цели отводится 900 000 байт. Здесь также важную роль играют прямоугольные множества. К процедуре bitblt часто происходят обращения, когда надо преобразовать прямоугольное множество основной памяти в прямоугольное множество памяти экрана. Пусть, например, в некотором прямоугольном множестве основной памяти содержится буква А. Всякий раз, когда на экране должна появиться буква А как часть текста, выводимого программой, происходит обращение к процедуре bitblt, переносающей это прямоугольное множество в экранную память.

Аппаратное сканирование памяти — это принципиальная конструктивная особенность, присущая графическим терминалам с описанным выше буфером памяти для экрана, или так называемым «буфером-фреймом». Подобные дисплеи получают все более широкое распространение и уже применяются в персональных компьютерах. Свидетельство тому — дисплей персонального компьютера фирмы MacIntosh.

В традиционных системах с графическими дисплеями обращения к памяти происходят по более сложным алгоритмам. Представление рисунка на экране осуществляется, например, при помощи списка точек, линий и других графических элементов. Для того чтобы высветить рисунок на экране, необходимо просмотреть список. При этом простые рисунки мож-

но высветить быстро, потому что их списки короче, однако для изображения сложных рисунков может потребоваться слишком много времени.

Конфигурация битов в какой-нибудь прямоугольной области памяти называется битовой картой. Каждая битовая карта представляет на экране определенное изображение: типографский знак, простой рисунок-символ или еще какой-нибудь графический элемент. В программе КРАБЫ, например, используются некоторые битовые карты из основной памяти, при помощи которых на экране строятся крошечные ракообразные различной формы. Краба представляет следующая цепочка из нулей и единиц (единицы соответствуют темным, а нули — светлым точкам на экране):

```
01101110. . .11110111. . .10000001
. . .10111101. . .01111110. . .
01111110. . .10111101. . .01000010
```

Читатели, желающие промоделировать bitblt, могут нарисовать на листе бумаги квадратную решетку размерами 8×8 . Тогда приведенная выше цепочка будет представлять прямоугольную область в основной памяти, а квадратная решетка — часть экранной памяти. Скопируйте цепочку на решетку, просканировав побитно ту и другую. Теперь можно воспроизвести изображение на решетке, закрасив черным цветом каждую ячейку, содержащую единицу, и оставив светлыми ячейки, содержа-

щие нули. При этом мы получим изображение краба, занимающего небольшую часть экрана (см. рисунок на с. 73).

Выше я уже отмечал, что любая часть экрана, не охваченная никаким окном, закрашивается точечным узором в серый цвет. Когда крабы напали на экран терминала Пайка, они сначала ползали по серой области. Натолкнувшись на окно, они начали его поедать. При этом Пайк шутливо заметил, что «серый цвет — это дорожки для крабов, а своих дорожек они не поедают». На самом деле крабы ничего не поедают, а скорее асфальтируют. Когда программа КРАБЫ двигает свое детище, она проверяет поле, находящееся непосредственно на пути краба; если оно не серое, то программа окрашивает его в серый цвет. Затем она перемещает краба в только что обработанную область. Обе операции осуществляются при помощи процедуры bitblt.

В простейшем варианте работы процедура bitblt заменяет каждый бит d на битовой карте, являющейся результатом, соответствующим битом s исходной битовой карты. Кратко эту операцию замещения можно обозначить формулой

$$d - s.$$

Любую область экрана можно сделать серой, воспользовавшись этим вариантом процедуры bitblt. Поле, находящееся непосредственно на пути краба, можно рассматривать как битовую карту-результат, а битовую карту в основной памяти, содержащую шаблон серого цвета, можно считать исходной битовой картой.

Затем программа КРАБЫ перемещает краба. Она стирает изображение краба в том месте, где оно в данный момент находится, и высвечивает его на новом месте. Чтобы выполнить соответствующие операции, используется более сложный вариант процедуры bitblt, который можно условно обозначить следующим образом:

$$d - s + d.$$

Здесь каждый бит поля результата замещается его комбинацией с соответствующим битом источника. Эта комбинация представляет собой логическую операцию исключающего ИЛИ, которую мы впредь будем обозначать как XOR или знаком «+». В результате применения операции XOR бит d будет равен 1 тогда и только тогда, когда либо s , либо d (но не оба одновременно) имеют значение, равное 1. Операцией XOR очень удобно пользоваться как при стирании старого изображения краба, так и при построении нового. К сожалению, в

этом варианте процедура bitblt не может воспользоваться стандартным изображением краба, которое мы получили выше при помощи карандаша и бумаги.

Посмотрим, например, что будет, если операцию XOR применить к стандартной битовой карте краба и точечному шаблону серого цвета. Когда операция XOR применяется к точке серого поля (1) и какой-либо точке тела краба (также 1), результатом будет светлая точка ($1 + 1 = 0$). Если, однако, данная точка тела краба является светлой, то результатом будет темная точка ($0 + 1 = 1$). Этим объясняется странный вид восьми специальных битовых карт краба, которыми пользуется программа КРАБЫ при перемещении своих подопечных (см. рисунок на с. 74). Каждая из этих битовых карт представляет краба со специальным подбором светлых точек на его теле. Существует восемь возможных способов поместить краба на серое поле, и каждому из этих способов соответствует своя битовая карта краба.

Программа перемещает краба, сначала стирая его, а затем высвечивая на новом месте. Чтобы стереть краба, процедура bitblt отображает при помощи операции XOR битовую карту краба с соответствующим подбором светлых точек на светящееся в данный момент изображение краба. В результате изображение краба исчезает и на его месте остается серое поле. Чтобы высветить новое изображение краба, процедура bitblt опять пользуется специально подобранной битовой картой краба, которую она отображает посредством операции XOR на серое поле. Новое изображение краба ничем не отличается от старого, поскольку светлые точки на его битовой карте точно соответствуют серому полю, на которое краб перемещается.

Алгоритм, управляющий поведением крабов, можно разбить на пять шагов:

1. Стереть изображение краба в том месте, которое оно в данный момент занимает.
2. Определить новое место.
3. Если новое место не является серым полем, то сделать его серым, изменить данные о положении краба и выбрать случайным образом новое значение скорости передвижения.
4. Высветить краба на новом месте.
5. Изменить случайным образом скорость краба. Вернуться к шагу 1.

Крабы, как и полагается, движутся боком. Поэтому новое место всегда находится сбоку от краба, по ту или другую сторону от него. Новое место определяется текущими значениями направления и скорости движения

краба. Обе эти величины подвергаются на шаге 5 случайным изменениям. Возможны несколько направлений движения, а его скорость варьируется в пределах от 1 до 7 пикселей (ячеек на экране) на одно перемещение.

Во время нашего разговора с Пайком крабы сначала появились в верхней части экрана. Затем, совершая хаотические перемещения по серым полям, они стали медленно спускаться вниз. Встретив окно, они прогрызли его границу и проникли внутрь. Было хорошо видно, как они прогрызают окно, потому что на изображении стали появляться крошечные серые пятна. Внешне это выглядело очень эффектно: крабы как будто пожирали верхний слой бумаги, под которым протрупало серое волокно.

В значительной степени эта иллюзия объяснялась шагом 3 алгоритма программы КРАБЫ, поскольку на этом шаге краб уходит с только что проеденного им места так, словно он посидел на нем какое-то мгновение, пережевывая проглоченный кусок, прежде чем отправиться дальше в поисках новой порции. Благодаря случайному характеру движения крабов окно становится «дырявым» сразу на большой поверхности. Если бы не эта особенность их движения, то эффект, производимый крабами, скорее напоминал бы процесс выкапывания нор. Благодаря случайному характеру движения крабов человек за терминалом не сразу понимает, что происходит, и его реакция оказывается замедленной.

Пока мы наблюдали за тем, как крабы проедали окна на экране терминала, Пайк рассказал мне о том, как по-разному реагировали его коллеги, впервые столкнувшись с нападением крошечных ракообразных. Часто такое нападение устраивалось исподтишка. Когда ничего не подозревающий сотрудник отходил на минутку от терминала, кто-нибудь из шутников запускал на его терминале программу КРАБЫ.

Поскольку терминал Блит снабжается обычно устройством «мышь», управляющим перемещением курсора на экране, сбитый с толку сотрудник иногда лихорадочно пытался противостоять крабам при помощи этого устройства. Однако все подобные попытки оказывались тщетными, так как крабы с таким же аппетитом набрасывались на курсор, как и на текст. При этом «съеденный» курсор через некоторое время вновь появлялся на экране. И, хотя наступление крабов можно таким образом несколько замедлить, остановить их невозможно и изображение в окнах продолжает разрушаться.

Иногда программист, чей терми-

нал подвергся нападению крабов, пытался накрыть их окном. Эта мера также несколько замедляла продвижение крабов, однако они постепенно прогрызали вокруг себя все большее поле и в конце концов вырывались из окна.

Я снова спросил Пайка, каким образом можно остановить крабов. На этот раз он смилостивился: «Выключите терминал и включите его снова». Такая мера оказывается действенной, однако при этом пользователю приходится заново подключаться к центральной ЭВМ.

Карделли и Манэссе, авторы программы КРАБЫ, изложили историю происхождения программы в неофициальной докладной записке. Конструкция и правила пользования терминалом Блит произвели на них очень сильное впечатление, и они решили проанализировать возможности нарушения этих правил. Они обратились к Пайку, который дал им текст интересовавших их фрагментов программного обеспечения системы. Поразмыслив, двое программистов пришли к выводу, что некоторые возможности нарушения правил, принятых в конструкции терминала, могут оказаться полезными. В этом смысле примером служит программа ЛИНЗА, которая увеличивает заданную часть экрана. (На рисунках на с. 76-77 видно окно программы ЛИНЗА, увеличивающее текст, пораженный крабами.) ЛИНЗА представляет собой нарушение правил, потому что программа, имеющая одно окно, не должна иметь прямого доступа к содержимому другого окна.

Вначале Карделли и Манэссе намеревались имитировать видеоигру QIX, но затем вместо этого написали программу МИКРОБЫ (MEASLES), в результате выполнения которой по серым участкам экрана между окнами начинали плавать маленькие шарики. Первые же испытания показали, что микробов можно было заблокировать, накрыв их окном. Авторы сочувствовали своим созданиям: «Внезапно бедные маленькие микробы оказались запертыми, им было куда двигаться, нигде вокруг не было спасительного серого поля. Они застыли, полные ужаса, и были похоронены под окном».

Первая реакция авторов на эту неудачу заключалась в том, чтобы заставить пойманных микробов периодически вспыхивать, досажая тем самым человеку, который поймал их. Новая программа получила название ЗЛЫЕ МИКРОБЫ.

Однако даже «злые микробы» были ничто по сравнению со следующим замыслом, пришедшим в голову неутомимым авторам: «А почему бы

микробам не прогрызть себе путь и выйти таким образом из окна?» Соответствующая программа получила имя ГОЛОДНЫЕ МИКРОБЫ. Карделли пишет: «У новой версии был уже совсем другой характер. Она уже не была просто остроумной, она внушала трепет».

Кто-то, наблюдая за работой программы на экране, заметил, что микробы напоминают чем-то крошечных ракообразных. Карделли и Манэссе реализовали изображения краба, и таким образом родилась программа КРАБЫ. Следом за ней появились и другие программы подобного рода, в том числе такие, которые оставляли на экране отпечатки следов птиц и зверей.

Сотрудники, ставшие жертвой этих шуток, принимали ответные меры. Была написана программа ДАВИ КРАБОВ, которая просматривала память терминала в поисках программы КРАБЫ. Найденные программы уничтожались, а на экране крабы превращались в маленькие пузырьки. К сожалению, очередная модификация в программном обеспечении терминала сделала программу ДАВИ КРАБОВ неэффективной.

В лабораториях исследовательского центра в Мюррей-Хилл есть и другие занимательные программы. Меня познакомили с одной из таких программ, написанной Р. Хардином. Она превращает произвольный текст на английском языке в цепочки фонем, которые затем перегруппировываются, снова превращаются в слова

английского языка и выводятся в виде нового текста. Результирующий текст (после некоторого редактирования человеком) выглядит как стихотворение слегка сумасшедшего поэта:

Better buy perfect Topeka beagle
buffers
Topeka beagle buffers sputter fiber
beaks
Effeter fiber beaks abetted feeble
puppies
Worst Topeka beagle puppies
feature viper-pique.

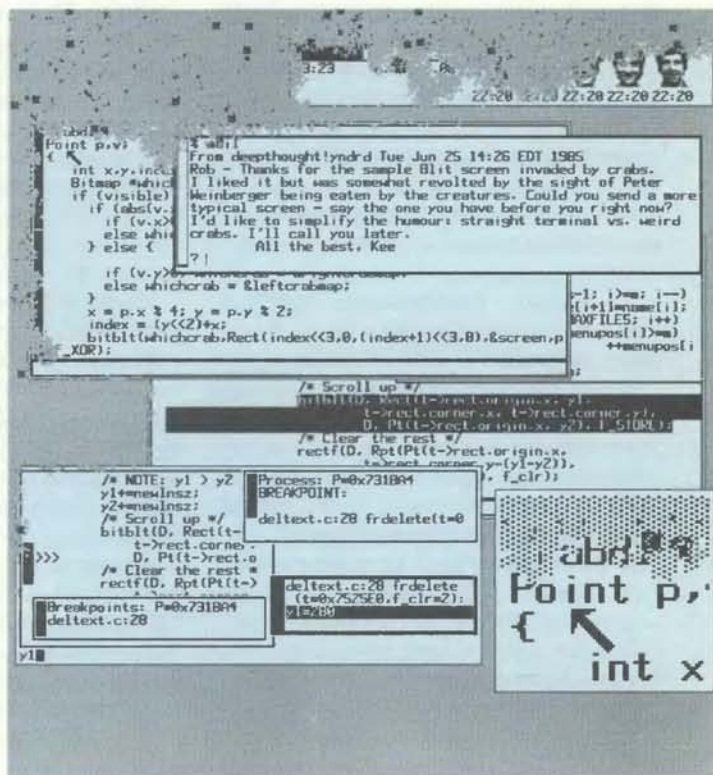
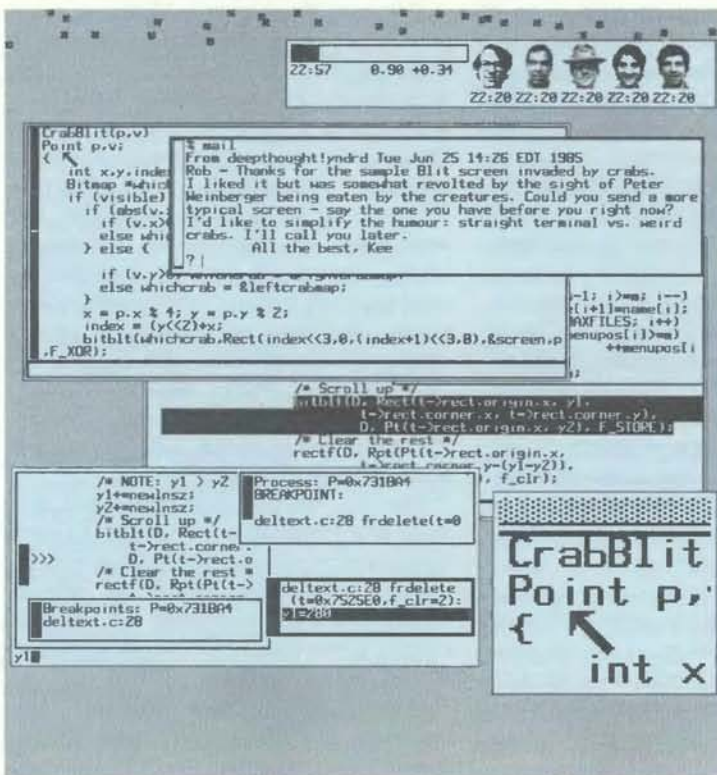
Несколько более серьезная работа была проведена при создании программы для игры в шахматы. В 1980 г. чемпионат мира по шахматам среди ЭВМ был выигран системой Belle, представлявшей собой комплекс из специализированной ЭВМ и программы, написанной в лабораториях центра в Мюррей-Хилл. Авторы программы — К. Томпсон и Д. Кондон. (Я думаю посвятить этой и другим современным программам для игры в шахматы одну из своих следующих статей.)

Компьютер, играющий в шахматы, созданный, казалось бы, для развлечения, возвращает нас к разговору о соотношении между работой и игрой. Профессор А. Перлис, преподающий информатику в Йельском университете, в своей недавно опубликованной книге «Структура и интерпретация программ для ЭВМ» (см. «Библиографию» на с. 84) высказывает мнение, получившее довольно широкое распространение сре-

ди специалистов по вычислительной технике и информатике.

«Я думаю, очень важно, чтобы в научной работе всегда оставалось место для шутки и развлечения. Когда вычислительная техника и программирование только зарождались, в нашей работе было много веселого и забавного.» Однако, полагает Перлис, сейчас для этого остается все меньше места, потому что исследователям предъявляются серьезные требования, заставляющие их все в большей степени сосредоточивать внимание на «гайках» и «винтиках», из которых состоят изобретаемые ими системы. Но такими вещами следует скорее заниматься тем, кто внедряет научные достижения в производственные системы. «В последнее время мы стали чувствовать себя так, будто бы мы действительно несем ответственность за успешное, безошибочное функционирование этих систем. Мне кажется, это неправильно. Я думаю, наша роль заключается в том, чтобы расширять их возможности, открывать для них новые направления и поддерживать в лабораториях веселое настроение.»

Продуктивность научных исследований в вычислительной технике, как в серьезных, так и в шуточных разработках, объясняется прежде всего свободной творческой атмосферой, в которой новые идеи, по-видимому, порождаются наполовину людьми, а наполовину самими машинами. Можно даже сказать, что без этого веселого настроения не было бы и быстрого



Экран терминала, показывающий вывод из пяти программ, подвергшихся атаке крабов

научного прогресса.

Перед тем как закончить статью, я не могу не вернуться еще раз к терминалу Блит и его процедуре bitblt. Пайк предложил две интересные задачи, которые демонстрируют эффективность и гибкость процедуры bitblt. Предположим, что читатель располагает двумя версиями процедуры bitblt, описанными выше. Одна из них замещает битовую карту в поле результата исходной битовой картой. Другая выполняет операцию XOR.

Задача 1. Очистить прямоугольник. Не прибегая к специальной, заполненной единицами битовой карте в основной памяти терминала, воспользуйтесь процедурой bitblt либо в версии замещения, либо в версии с операцией XOR, чтобы очистить заданный прямоугольник на экране.

Задача 2. Повернуть изображение. Квадратное изображение размером $n \times n$ занимает верхний левый угол экрана Блит размером $2n \times 2n$. Воспользуйтесь процедурой bitblt, чтобы повернуть изображение на 90° . Считайте, что вне изображения экран чист.

В первой задаче не разрешается делать никаких предположений о содержимом внешней по отношению к заданному прямоугольнику части экрана. Какой должна быть в этой ситуации битовая карта, которая могла бы послужить исходной для процедуры bitblt?

В обеих задачах воздействие процедуры bitblt на заданный прямоугольник (не важно, какой формы)

считается одной операцией. Первая задача решается однократным обращением к процедуре bitblt, вторая требует $3n + 1$ таких обращений. Сможет ли кто-нибудь найти более быстрое решение?

В АВГУСТОВСКОМ номере журнала я предложил читателям найти изящное доказательство утверждения о том, что при помощи приема Дж. Венмакера можно действительно отыскать самый длинный путь на «дереве», сделанном из шнурков. Я говорил, что для определения самого длинного пути достаточно двух операций подвешивания. Сначала нужно взять дерево за любой узел и подвесить его. Затем нужно взять дерево за самый нижний узел и снова подвесить его. Самый длинный путь проходит от узла, за который было подвешено дерево во второй раз, до узла, который теперь оказался самым нижним.

Выше мы неявно предполагали, что дерево имеет единственный самый длинный путь. На самом деле у дерева может быть несколько различных путей одинаковой длины, которая превышает длины всех остальных путей. Следовательно, на обоих шагах процедуры у нас есть выбор между несколькими узлами и в такой ситуации можно выбрать один из таких узлов произвольно.

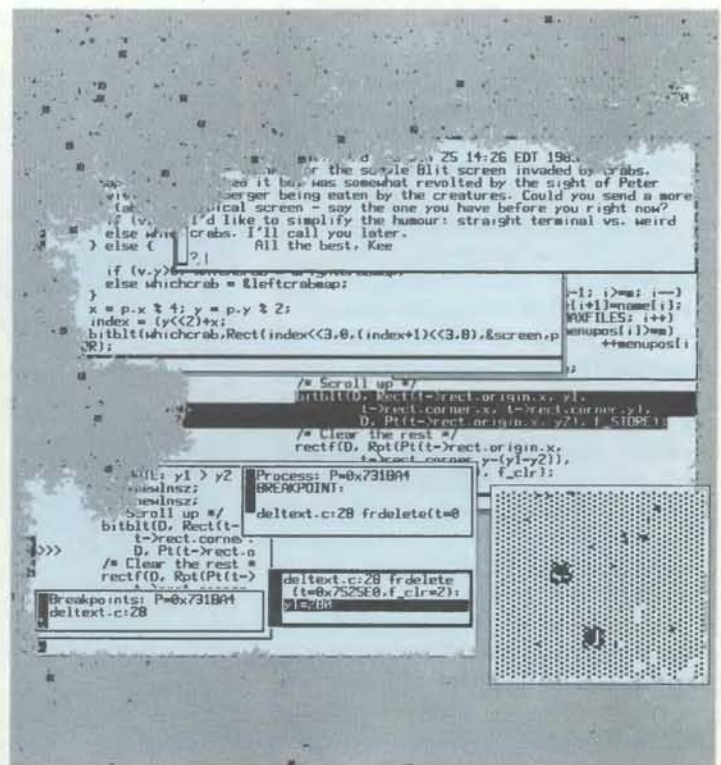
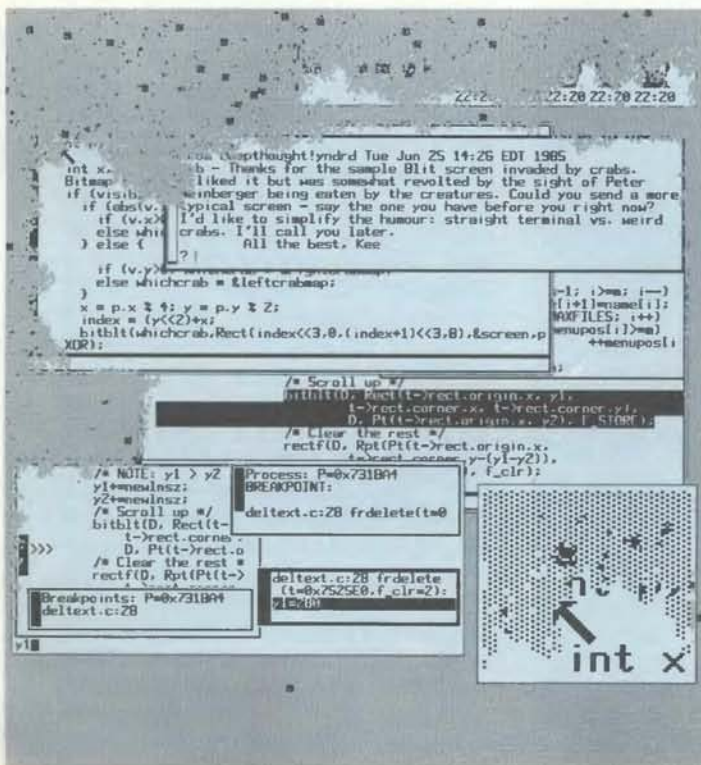
Мне прислали значительно больше доказательств, чем я ожидал. Премия за самое изящное доказательство можно было бы присудить почти на равных основаниях следую-

щим читателям: Дж. Бартольди III из Атланты (шт. Джорджия), Н. Дершовицу из Эрбаны (шт. Иллинойс), У. Липпу из Милфорда (шт. Коннектикут), Д. Миду из Дейвиса (шт. Калифорния), и Дж. ван-Бентему из Гронингена (Голландия). Нетрудно догадаться, что все эти лица, за исключением Липпа, так или иначе связаны с университетами. Это соответственно Технологический институт шт. Джорджия, Иллинойский университет в Эрбана-Шампейн, Калифорнийский университет в Дейвисе и Гронингенский государственный университет.

Под «изящным доказательством» я подразумеваю сочетание краткости и ясности. В рамках нашей рубрики это означает также минимальное количество обозначений, уравнений и неравенств. С учетом всех этих требований победителем можно считать Бартольди. Вот его доказательство:

«Пусть H — точка подвеса, а L — нижняя точка. Утверждение: L должна быть одним из концов самого длинного пути.

Доказательство: Пусть A — другой конец самого длинного пути и $A \neq L$. Путь максимальной длины, одним из концов которого является точка A , состоит из участка, ведущего вверх, и участка, ведущего вниз. Однако первый участок не превосходит расстояния от A до H , а второй участок не превосходит расстояния от H до L . Таким образом, путь от A до L представляет собой путь максимальной длины.



Пользователь может отбить подобное нападение, только выключив терминал и повторно подключившись к системе

Издательство МИР предлагает:

Ленг К. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ. Руководство для физиков и астрономов

В двух книгах
Перевод с английского

Книга 1 включает разделы, посвященные непрерывному излучению и монохроматическому излучению в спектральных линиях. Приведены законы излучения, уравнения распространения электромагнитных волн, уравнения переноса; атомные параметры и спектры, характеристики линий, условия их возбуждения и т.д.

Книга 2 посвящена процессам в газах (столкновениям, переносу, газодинамике, гравитационной неустойчивости), ядерной астрофизике и частицам высоких энергий. Сюда же включены материалы по земному сфероиду, небесным координатам, массам и движению небесных тел и основным положениям теории относительности.

Справочник служит ценным пособием для физиков, астрономов, астрофизиков, математиков, механиков, которые найдут в нем сведения и литературные ссылки, до того разбросанные по разным источникам. Справочник может быть полезен также студентам старших курсов.

«Мир», 1978, 55 л.

Цена 5 р. 50 к. за комплект.

Заказы на эту книгу направляйте по адресу:

103050, Москва, Петровка, 15,
магазин № 8 «Техническая книга».



Если теперь подвесить дерево за точку L , то по аналогичным соображениям точка A окажется самой нижней».

Надо сказать, что приведенное доказательство скорее интуитивное, чем строгое. Тем не менее оно выглядит убедительным, потому что мы представляем себе мысленно, как участки самого длинного пути, проходящего через A , которые ведут соответственно вверх и вниз, висят рядом с путем от H к L . Строгое доказательство потребовало бы значительно больше места.

Первое устройство из тех, которые мы обсуждали в августовском выпуске журнала, состояло из доски, нескольких гвоздей, резиновых колец и длинного гладкого стержня. Это устройство позволяет найти прямую, наилучшим образом аппроксимирующую несколько экспериментальных точек на графике. Я говорил, что в доску нужно вбить гвозди, представляющие экспериментальные точки, затем накинуть резиновое кольцо на каждый гвоздь и на стержень, после чего следует отпустить стержень, который, подождав, быстро приходит в равновесие.

Я утверждал, что равновесное положение стержня минимизирует полную потенциальную энергию системы (что правильно) и что, следовательно, сумма расстояний от точек до стержня, т.е. сумма отрезков, перпендикулярных стержню, должна быть минимальной (что неправильно). Я имел в виду формулу для силы, которая обусловлена растяжением резинки и пропорциональна ее удлинению. Однако, как заметили многие читатели, энергия, запасенная каждой резинкой, пропорциональна квадрату ее удлинения. Чувство стыда за эту оплошность было, однако, более чем скомпенсировано. Я понял, что устройство М. Хоули гораздо ближе к цели — вычислению по методу наименьших квадратов, чем я ожидал. Остается одно важное различие в том, что следует считать расстоянием. Для вычисления по методу наименьших квадратов нужно, чтобы резинки были натянуты вертикально, а не перпендикулярно стержню (если только стержень не занимает горизонтального положения).

Несколько читателей заметили, что резиновые кольца должны быть идеальными в том смысле, чтобы у них не было провисающих участков. Этому требованию можно удовлетворить следующими способами. Ч. Диллингем из Нью-Йорка (шт. Нью-Йорк), заменяет гвозди на цилиндры. Длина такого цилиндра равна длине нерастянутой резинки. Каждая резинка прикрепляется к доске

внутри цилиндра. Резинка удлиняется, только когда ее вытягивают из цилиндра и накладывают на стержень. Р. Файньюкейн из Уотербьюри (шт. Вермонт), решает эту проблему, пропуская каждую резинку через отверстие на доске, соответствующее экспериментальной точке.

Гидравлическое устройство для решения кубического уравнения не вызвало критических отзывов, за исключением замеченной несколькими читателями путаницы. Дело в том, что члены третьей и второй степеней уравнения представляются соответственно конусом и параболоидом, а не наоборот. В этом можно убедиться, проведя несложные вычисления.

Я думаю, что пройдет довольно значительное время, прежде чем мы сможем вернуться в наших статьях к аналоговым устройствам. Позвольте мне, так сказать, на прощание представить вам картонное устройство для подсчета площади земельного участка, присланное А. Лейзаром из Тинка (шт. Нью-Джерси).

Лейзар пользуется картонной коробкой, которую можно найти у любого продовольственного магазина, и портативными весами, чтобы проверить точность вычисления «площади земельного участка с нерегулярной границей». Он наносит контуры участка на лист картона и вырезает модель ножницами. Затем он взвешивает полученную модель и квадратик того же картона, отвечающий в принятом им масштабе площади 1 акр. Поделив первый вес на второй, он получает площадь участка.

Со всех концов света продолжает поступать так много результатов расчетов по программе PINT, что я вынужден опубликовать новую среднюю величину. При подсчете были учтены все оценки числа π , вычисленные по 1000 выстрелам и полученные с тех пор, как было подсчитано значение, приведенное в сентябрьском номере журнала. В течение двухмесячного периода накопления данных я наблюдал, как среднее значение постепенно уменьшалось, достигнув в какой-то момент 3,129. Положение несколько улучшилось, когда прибыла почта из Европы и Азии, и среднее значение снова начало подниматься. Хочу выразить особую признательность многочисленным участникам, которые читают издание нашего журнала на немецком языке (Spectrum der Wissenschaft). Благодаря им округленное среднее значение на сегодняшний день оказалось правильным с точностью до двух знаков после запятой. Всего было получено 126 писем, удовлетворяющих поставленным требованиям, и теперь среднее значение числа π равно 3,137.

Сладкое могущество; жидкие кристаллы; «разгадка» тайны Лох-Несса

ФИЛИП MORRISON

Сидни Минц. Сладость и могущество: роль сахара в современной истории

SWEETNESS AND POWER: THE PLACE OF SUGAR IN MODERN HISTORY, by Sidney W. Mintz. Viking Penguin, Inc. (\$20)

В НАШИ дни основу питания приблизительно у трех четвертых частей населения Земли по-прежнему составляют крахмалсодержащие продукты. В зависимости от района это картофель, рис, кукуруза или просо. В дополнение к пище, приготовленной из этих продуктов, широко используются различные соусы и острые приправы. Примерно таким же был рацион оседлых народов, по крайней мере начиная с тех времен, о которых до нас дошли свидетельства. Так, посуда для приготовления риса и различных приправ к нему обнаружена в китайских захоронениях додинастического периода. В книге приводятся наблюдения этнографа Одри Ричардс, которые помогают понять значение основного продукта в меню различных народов.

В наши дни население развитых стран, включая его беднейшие слои, больше не придерживается традиционной системы питания. В сравнении с нормами, существовавшими веками, нынешняя диета, например у американцев, столь же экзотична, как молоко с кровью, потребляемое масаями, или ворвань и мясо оленя карибу — деликатес охотников племени иннуитов. Вообще американцы потребляют в настоящее время меньше углеводов, чем в 1910 г., их место в рационе частично заняли жиры. Основным источником углеводов сейчас — сладости. Можно считать, что во времена Т. Рузвельта основным продуктом питания в Америке была мука, по сравнению с которой сахар «поставлял» в 3 раза меньше калорий. Отметим, однако, что в сельскохозяйственных районах на долю основного продукта приходится от 80 до 90% потребляемых калорий.

Рецензируемую книгу можно отнести к разряду работ по истории экономики. Ее автор — антрополог, обладающий глубокими знаниями и чувством юмора. В настоящее время Сидни Минц — профессор в Институте Джона Гопкинса. Научную деятельность

он начал два десятилетия назад, изучая жизнь пуэрториканцев с их изнурительным трудом на плантациях сахарного тростника. Свои полевые исследования Минц обобщил в данной книге, подкрепив их многолетними теоретическими изысканиями в стенах библиотек.

Вот уже около тысячи лет на «сахарных островах» от Кипра до Барбадоса и Фиджи главной культурой является сахарный тростник, родина которого Индия. Долгое время он выращивался на плантациях с применением труда невольников. «Сахар... был одним из важнейших демографических факторов в истории человечества. Благодаря этому продукту миллионы обращенных в рабство африканцев оказались в Новом Свете, в частности на юге Северной Америки, на островах Карибского моря и его побережье. Сахар был тем фактором, который погнал индусов в Наталь и в Оранжевое свободное государство, на острова Маврикий и Фиджи. Сахар вызвал последовательное переселение различных этнических групп на Гавайские острова, и он же до сих пор способствует движению населения Вест-Индских островов».

Посмотрим теперь, как менялся спрос на сахар в метрополиях. Как случилось, что лекарство, одна из редчайших специй, украшение стола вельмож Елизаветинской эпохи превратилось во многих странах в важнейший источник калорий? «Редкость в 1650 г., деликатес в 1750 г., сахар превратился в необходимость к 1850 г.». Одной из главных причин такого превращения был чай — горьковатый на вкус тонизирующий напиток, привычка к употреблению которого быстро распространялась от буржуа к менее имущим слоям, вплоть до деревенских бедняков.

К 1850 г. сахар получил повсеместное распространение, однако еще не занял ведущего положения среди продуктов питания. Он стал верным помощником пекаря, улучшая вкус изделий из муки, основного в то время продукта питания. С ростом промышленного капитала фермеры потеряли свое право на исключительные закупочные цены и высокие доходы. Бывшие невольники получили свободу, и сахар, поступающий с механизми-

рованных плантаций, превратился в Викторианскую эпоху в основной источник дешевых калорий. К 1900 г. в Англии он обеспечивал уже 1/6 часть всех потребляемых калорий, главным образом за счет женщин и детей в рабочих семьях, поскольку им редко перепали мясо и жиры.

Этот второй резкий скачок в потреблении сахара и составляет главную тему исследования. Первый шаг, как мы уже говорили, был порожден закрепившейся привычкой заканчивать каждый прием пищи чашкой чая с двумя кусками сахара. Следующий шаг — превращение сахара в один из главных источников калорий, по мере того как у потребителя появились свободные деньги.

К этому времени качество жизни существенно изменилось. Население быстро росло; появилось большое число рабочих рук, желающих больше заработать и получить больше товаров и услуг в обмен на свои деньги. Их время превращалось, таким образом, в деньги, а деньги в товар. Чай и бисквиты стали неотъемлемой частью рабочего перерыва. Все больше фабричных рабочих, закусив днем в кафе, возвращались домой к вечерней трапезе, которая традиционно заканчивалась десертом. Еще одним фактором, предопределившим победное шествие сахара, была высокая калорийность сахарного тростника. Плантатор, вырастивший сахарный тростник, поставляет потребителю в 4 раза больше калорий, чем фермер, засадивший такой же участок земли картофелем. Кроме того, рост уровня механизации с каждым новым десятилетием давал возможность рабочему приобретать все больше чая, табака и сахара в обмен на меньший объем производимой работы.

Широкое потребление сахара продолжается и поныне, правда с некоторыми отличиями. Ежедневные семейные трапезы с общим для всех меню постепенно отходят в прошлое: часто кто-либо из членов семьи предпочитает сам готовить себе пищу или питаться вне дома (эти тенденции также способствуют росту потребления сахара). Давно нарушен еженедельный ритм питания: рыба по пятницам, цыпленок по воскресеньям. То же можно сказать и о сезонных сменах в меню: если раньше черное пиво, ягоды, свежий укроп, молодой картофель потреблялись в определенное время, фруктовый торт, пропитанный густым сиропом, пекли на Новый год, а индейку подавали к столу два раза в год, то сейчас пиво и индейка, равно как и прочие блюда, входят в меню круглый год. Опрос, проведенный среди семей умеренного достатка, показал, что средний потре-

битель ежедневно имеет 20 «контактов» с различного рода пищей — «гастроаномалия», как удачно сострел французский социолог Клод Фишер. Теперь потребитель в свой 30-минутный обеденный перерыв может свободно выбирать между бифштексом «Биг-Мак» и ножкой цыпленка «Джино»; оба блюда содержат сахар, даже если не учитывать подслащенных напитков, которыми они запиваются.

Не исключено, что, подобно кофеину и табуку, сахар оказывает на человека легкое наркотическое действие (возможно, мы испытываем приятное ощущение при поступлении в кровь глюкозы). Следует отметить, что число продуктов питания, которые могут быть отнесены к разряду легких наркотиков и которые человек может принимать сравнительно длительное время в большом количестве, довольно велико.

Прочитав книгу, читатель, несомненно, расширит свой кругозор. Многочисленные примечания к ней вызывают живейший интерес, то же можно сказать и об иллюстрациях.

Родни Коттерилл. КЕМБРИДЖСКИЙ «ПУТЕВОДИТЕЛЬ» ПО МАТЕРИАЛЬНОМУ МИРУ

THE CAMBRIDGE GUIDE TO THE MATERIAL WORLD, BY RODNEY COTTERILL. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (\$34.50)

СЕЙЧАС мы знаем, что нарушение некоторых, хотя и не всех, симметрий, присущих физической системе, — одно из важнейших свойств реального мира. Еще Фрэнсис Бэкон когда-то сказал: «Нет такой совершенной красоты, которая не имела

бы какой-либо странности в пропорциях». А наиболее удачное подтверждение сказанному — это жидкие кристаллы. Еще сто лет назад было обнаружено, что многие длинные, сравнительно жесткие молекулы, чаще всего органические цепочки, имеющие много двойных связей или колец, могут в определенном интервале температур стабильно располагаться параллельно друг другу, но в случайных положениях — подобно рыбьей стае, плывущей вверх по течению реки. Существуют и другие виды упорядочения по направлению, сходные с этим, но несколько более сложные. Возникающая при этом фаза — ни твердое тело, ни жидкость, ни газ — называется жидким кристаллом. Симметрия его решетки нарушена, а направленное оптическое действие, обычное для кристаллов, сопровождается некоторыми свойствами, присущими изотропным жидкостям.

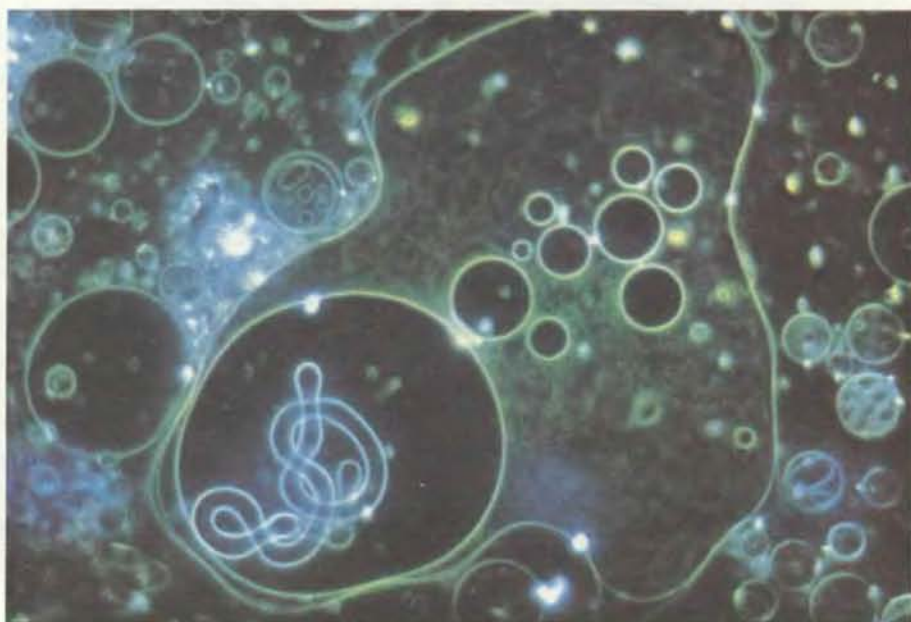
Такие вещества сейчас называют мезогенами. И они не так уж редки: почти 1% всех известных нам органических соединений принадлежит в той или иной области температур к этому классу. Каждый из нас видел переливчатые крылья жука или быстро меняющиеся цифры на циферблате электронных часов, послушные импульсам электрического поля. Эта фаза имеет важное значение и для живых организмов, ведь оболочка каждой клетки включает два липидных слоя, состоящие из ориентированных, но подвижных длинных углеродных цепочек. Эта оболочка служит не только «мешком», в котором помещается клетка, но и «избирательно пропускающими воротами». Увлекательный и подробный рассказ об этих удивительных веществах сопровождается

несколькими десятками фотографий, некоторые из них сделаны с помощью микроскопа, а также пояснительными схемами и диаграммами. И все это лишь одна из 18 глав этой замечательной книги о строении вещества.

Здесь стоит упомянуть и о других главах книги, из которых читатель также почерпнет немало нового для себя. Когда-то сторонники атомистического учения полагали, что вещество состоит лишь из атомов и пусто-го пространства. Теперь мы принимаем в расчет еще и атомные взаимодействия. Все они электромагнитные, и их несколько видов, от знакомого нам по школьным учебникам электростатического притяжения и отталкивания ионов до гораздо более слабых водородных связей, возникающих благодаря наведенному диполлю. Одна из глав посвящена воде, «всеобщему посреднику» нашего мира. Мы наблюдаем все процессы на молекулярном уровне, и перед нами — постоянно движущаяся, диссоциирующая, возвращающаяся в равновесие система молекул, объединенных то возникающими, то распадающимися водородными связями. Автор убедительно и без всяких алгебраических формул вводит нас в химию электролитов.

Еще одна глава посвящена минералам, в частности царству силикатов (составляющих более 90% всех видов минералов). В основе всего этого многообразия пространственных структур лежат более или менее прочно связанные атомные тетраэдры; в углах каждого из них находятся четыре атома кислорода, между которыми спрятан маленький атом кремния. Обычно у таких тетраэдров по меньшей мере один угол общий, а в кварце каждый атом кислорода принадлежит сразу двум тетраэдрам, так что формула этого вещества не SiO_4 , а SiO_2 . И в эти миры, построенные из тетраэдров, тут и там вставлены в правильном порядке атомы других элементов, составляющие вместе с кремнием и кислородом сложную кристаллическую решетку.

Когда эти тетраэдры выстраиваются в линейные цепочки, получается волокнистый асбест, если же они образуют плоские слои, то это — листы слюды. А вот — вещество аморфное и беспорядочное, хотя и «с лишь незначительными отклонениями от правила «угол к углу»». Это — обыкновенное оконное стекло. Все эти материалы известны нам уже давно. Но в наши дни появились и новые виды керамических материалов и стекол. Твердые, прочные и не боящиеся коррозии современные керамические материалы могут состоять из любой смеси атомов металлов и неметаллов. Связь атомов в металлах возни-



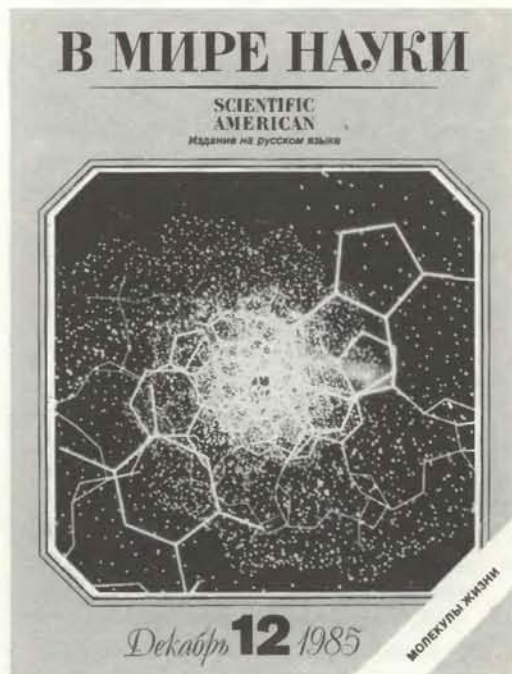
В водном растворе липиды спонтанно образуют двухслойные мембраны

Вниманию читателей!

Следующий номер журнала

В МИРЕ НАУКИ

будет целиком посвящен проблемам молекулярной биологии.
В него войдут статьи ведущих ученых мира о молекулярных основах жизни:
структуре и функциях биологических молекул,
природе взаимодействий внутри живого организма,
эволюции на молекулярном уровне.



Р.Вайнберг МОЛЕКУЛЫ ЖИЗНИ

Г.Фельзенфельд ДНК

Дж.Дарнелл РНК

Р.Дулиттл БЕЛКИ

М. Бретчер МОЛЕКУЛЫ КЛЕТОЧНОЙ МЕМБРАНЫ

К.Вебер, М.Осборн МОЛЕКУЛЫ КЛЕТОЧНОГО МАТРИКСА

В.Геринг МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ

С.Тонегава МОЛЕКУЛЫ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

С.Снайдер МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ МЕЖКЛЕТОЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ

М.Берридж МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ

А. Вилсон МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Предварительные заказы по наложенному платежу
на 12-й номер журнала «В мире науки»

можно направлять по адресу:

121019. г.Москва, Проспект Калинина, д.26, п/я 42

Московский Дом Книги



кает за счет обобществления электронов проводимости; эти связи ненаправленные, и поэтому почти сферические ионы могут легко менять свое положение.

А вот керамические материалы, в которых связи между атомами направленные, не пластичные, а твердые. Их хрупкость объясняется тем, что напряжение вызывает распространение крошечных трещин, «управляемое» соотношениями между площадью возникающей при этом поверхности и упругой энергией, высвобождающейся в объеме. Сейчас мы уже научились использовать дефекты структуры керамических материалов для повышения их прочности, в результате чего появились керамические режущие инструменты, лезвия ножей и даже дружины. Правда, в этой книге современным керамическим материалам пришлось несколько потесниться, чтобы освободить место для увлекательнейшего рассказа о стронии ржавчины, цемента и кирпича.

Судя по всему, автора особенно интересует физика твердого тела, но он отнюдь не ограничивается ею. Очень увлекательна глава, посвященная современной органической химии и немало выигрывающая от использования автором понятий квантовой механики. Не остались забытыми и истоки этой науки: читатель встретит в книге и рисунок Фридриха Кекуле (1862 г.), изображающий бензольное кольцо. Интересно, что в то время физики еще не вполне убедились в реальности существования атомов. В наши дни химии требуется не меньшее пространственное воображение, чем скульптору, а исследуемые им молекулы имеют формы бочек, корзин и пропеллеров. Читатель увидит великолепную серию фотографий, показывающих блеск органического сверхпроводника и изменения его цвета в зависимости от направления.

Понятие нарушенной симметрии особенно уместно при рассмотрении дефектов кристаллической решетки. Точечные дефекты, такие, как атомы внедрения и вакансии, изобразить очень легко. Немного труднее представить себе поверхностные дефекты, такие, как границы зерен. А вот сущность линейных дефектов — дислокаций — понять уже сложно. Рассказывая об этих объектах, автор широко использует метафоры и обыденные сравнения, а также великолепные иллюстрации, выполненные Ове Бру Соренсоном, на которых мы видим структуры из большого числа атомов.

Обращают на себя внимание фотографии, сделанные с помощью различных методов микроскопии. На них мы увидим сплетения и слои много-

численных дефектов решетки. Интерпретация этих фотографий (кстати, еще далеко не полная) дает ключ к пониманию ковкости и хрупкости, закали и усталости материалов, в особенности металлов. Эта отнюдь не простая тема рассматривается вполне детально. Минеральные стекла с непорядоченным плотным расположением атомов, связанных ковалентными связями, почти всегда хрупки. Здесь нет правильных атомных плоскостей, в которых могли бы скользить дислокации. Напряжение накапливается до тех пор, пока образец не треснет. Металлические же стекла, пока получаемые лишь в виде тонких лент путем сверхбыстрого охлаждения расплава, обладают весьма необычной совокупностью свойств, например своеобразной локальной пластичностью, совершенно несвойственной обыкновенным стеклам.

А вот перед нами тщательно выполненная в условных цветах сложная фазовая диаграмма железо—углерод в «стальной» области с малым содержанием углерода. Очень хорошо, что автор не забывает ради новинок и такие классические и удачные примеры, как этот. Не пользуясь формулами, он сумел доступно изложить основы современных представлений о химической связи, термодинамике и кинетике. Первые несколько глав книги, в сущности, представляют собой краткое введение в физическую химию.

Последние главы посвящены синтетическим и естественным полимерам — атомным сетям, цепочкам, спиральям и поверхностям, а также биохимии энергетики клетки и ее ферментативной регуляции, генетике, хлоропластам, нейронам и мышечным волокнам. Эти главы вовсе не претендуют на полноту изложения предмета, но зато предоставляют удачные примеры, легко вводящие читателя в область молекулярной биологии. Один отрывок, например, рассказывает о том, как хлоропласты подставляют слабому солнечному свету свою широкую поверхность, а к прямым лучам поворачиваются боком. Хлоропласты поворачиваются с помощью нитей актина, укрепленных в цитоплазме; механизм этого процесса проще, чем мышечное сокращение у животных, но ему аналогичен.

Родни Коттерилл — профессор материаловедения в Датском техническом университете. Он получил образование в Великобритании и Америке и занимался научными исследованиями как в этих двух странах, так и в Японии. Еще никому не удавалось так убедительно показать в популярной и великолепно оформленной книге глубинное единство физики и химии, аналогично между дефектами в кристаллах и ферментом рестрикта-

зой. Предупреждение: эта книга вполне серьезна, хотя автор и позаботился о том, чтобы сделать ее доступной для неспециалиста, не скупясь ни на меткие сравнения, ни на тщательно продуманные иллюстрации. Она содержит обширный материал (и о многих материалах) и несомненно является надежным справочным пособием как для любителя, так и для специалиста. Однако определенные замечания автора могут направить некоторых читателей по ложному следу. Например, постоянное движение в полупроводниках, так же как и во всех атомных основных состояниях (во всяком случае, пока протоны не распадутся!), несомненно имеет место, хотя может показаться, что профессор Коттерилл в этом не уверен.

Рональд Бинз. РАЗГАДКА ТАЙНЫ ЛОХ-НЕССА!

THE LOCH-NESS MYSTERY SOLVED, by Ronald Binns. Prometheus Books (\$18.95; paperbound \$9.95)

ПЕРВЫЕ сообщения о лох-несском чудовище появились в газетах в 1933 г., а знаменитые фотографии маленькой головы на вытянутой из воды длинной шее на фоне лишь водной поверхности (возникают сомнения — какой?) были сделаны 1 апреля 1934 г. лондонским... хирургом. Автор — ветеран лох-несских поисков — приводит в книге обе фотографии и повествует об истории этих поисков, которые ныне ведутся с применением подводных лодок и гидролокаторов. Книга представляет огромный интерес, однако ее честолюбивый заголовок все же не оправдывает себя. Автор заканчивает ее словами: «Лох-несская загадка, несомненно, будет продолжать будоражить воображение людей. Появятся новые паразитические фотографии и рассказы очевидцев, может быть, даже отснятая в спешке кинолента о чем-то темном и неясном... Но все минувшие 50 лет ясно свидетельствуют об одном: у нас нет абсолютно никаких научных доказательств существования чудовищ в Лох-Нессе, и лишь горстка людей продолжает встречать их там».

Дж. Буржес, почти слепой, но обладавший проницательным умом, хорошо представлял себе суть явления: «Есть нечто в образе дракона, что волнует человеческое воображение. Это, можно сказать, — необходимое чудовище». Так кто же он, лох-несский монстр? В каждом случае это разные вещи для разных очевидцев — то остроумная мистификация, то выдра, то плавник, то след лодки на воде, то баклан, но главным образом — общее непреодолимое желание верить.

Издательство
МИР
предлагает:

Ризетти П.
**ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ФОКУСИРОВАНИЕ**

Теория, методы и применение

Перевод с английского

Энциклопедически полное изложение одного из наиболее эффективных методов анализа и разделения белков. Автор книги пользуется репутацией лидера в разработке методов и вариантов изоэлектрического фокусирования (ИЭФ).

Содержание: Теоретические основы и принципы ИЭФ. Синтез коммерческих амфолитов-носителей. Лабораторный синтез амфолитов, их свойства. Оценка различных подходов к созданию «иммобилизованного» рН-градиента. Препаративные варианты ИЭФ (ИЭФ в растворах, гранулированных гелях, в блоках полиакриламидного и агарозного гелей, хроматофокусирование). Варианты аналитического ИЭФ. Идентификация фракций после ИЭФ (окраска серебром, радиографические, флуориметрические, энзиматические и иммунологические методы). Двумерное ИЭФ. Принципы и приемы оптимизации экспериментов по ИЭФ. Типичные ошибки, возникающие в ходе ИЭФ, и пути их предупреждения. Требования к реактивам, принципы подбора нужного диапазона рН, методы определения рН-градиента. Анализ причин, приводящих к артефактам при ИЭФ. Некоторые аспекты применения ИЭФ в биологии и медицине (анализ пептидов, белков бактерий и вирусов, сывороточных белков). Новый тип носителей для ИЭФ — «иммобилины» (производные акриламида).

Для молекулярных биологов, биохимиков, иммунологов и биологов других специальностей, занимающихся разделением и очисткой белков.

«Мир», 1986, 26 л. Цена 4 р. 20 к.



ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ

HELIOSEISMOLOGY: OSCILLATION AS A DIAGNOSTIC OF THE SOLAR INTERIOR. F.-L. Deubner and D. O. Gough in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 22, page 593-619; 1984.

SOLAR ROTATION. R.F. Howard in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 22, page 131-155; 1984.

SEISMOLOGY OF THE SUN. J. Christensen-Dalsgaard, D. O. Gough and J. Toomre in *Science*, in press.

SOLAR WAVES AND OSCILLATION. T. M. Brown, B. W. Mihalas and E. J. Rhodes, Jr., in *Physics of the Sun*, edited by P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. Mihalas and R. K. Ulrich. D. Reidel Publishing Co., in press.

Северный А. Б. СОЛНЦЕ КАК ЗВЕЗДА. — Природа, 1983, 812, № 4, с. 59-67.

Северный А. Б. ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ. — Земля и Вселенная, 1983, № 3, с. 9-14.

Копысов Ю. С. НЕЙТРИННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СОЛНЕЧНЫХ НЕДР. — Природа, 1983, 816, № 8, с. 59-69.

ОЛИГОСАХАРИНЫ

THE CONTROL OF GROWTH AND DIFFERENTIATION IN PLANTS. P. F. Wareing and I. D. J. Phillips. Pergamon Press, 1981.

STRUCTURE AND FUNCTION OF THE PRIMARY CELL WALLS OF PLANTS. Michael McNeil, Alan G. Darvill, Stephen C. Fry and Peter Albersheim in *Annual Review of Biochemistry*, Vol. 53, pages 625-663; 1984.

MANIPULATION OF THE MORPHOGENETIC PATHWAYS OF TOBACCO EXPLANTS BY OLIGOSACCHARINS. Kiem Tran Thanh Van, Patrick Toubart, Alain Cousson, Alan G. Darvill, David J. Gollin, Paulanne Chelf and Peter Albersheim in *Nature*, Vol. 314, No. 6012, pages 615-617; April 18, 1985.

**КАК УСТРОЕН АППАРАТ
ГОЛЬДЖИ**

EVIDENCE FOR EXTENSIVE SUBCELLULAR ORGANIZATION OF ASPARAGINE-LINKED OLIGOSACCHARIDE PROCESSING AND LYSOSOMAL ENZYME PHOSPHORYLATION. D. E. Goldberg and S. Kornfeld in *The Journal of Biological Chemistry*, Vol. 258, No. 5, pages 3159-3165; March 10, 1983.

INTERCOMPARTMENTAL TRANSPORT IN THE GOLGI COMPLEX IS A DISSOCIATIVE PROCESS: FACILE TRANSFER OF MEMBRANE PROTEIN BETWEEN TWO GOLGI POPULATIONS. James E.

Rothman, Ronald L. Miller and Lenore J. Urbani in *The Journal of Cell Biology*, Vol. 99, No. 1, Part 1, pages 260-271; July, 1984.

ATTACHMENT OF TERMINAL N-ACETYLGLUCOSAMINE TO ASPARAGINE-LINKED OLIGOSACCHARIDES OCCURS IN THE CENTRAL CISTERNAE OF THE GOLGI STACK. William G. Dunphy, Ruud Brands and James E. Rothman in *Cell*, Vol. 40, No. 2, pages 463-472; February, 1985.

**БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
КАТАЛИЗАТОРЫ**

CATALYTIC HYDROGENOLYSIS AND DEHYDROGENATION OVER COPPER-NICKEL ALLOYS. J. H. Sinfelt, J. L. Carter and D. L. C. Yates in *Journal of Catalysis*, Vol. 24, No. 2, pages 283-296, February, 1972.

SUPPORTED "BIMETALLIC CLUSTER" CATALYSTS. J. H. Sinfelt in *Journal of Catalysis*, Vol. 29, No. 2, pages 308-315; May, 1973.

CATALYSIS BY ALLOYS AND BIMETALLIC CLUSTERS. John H. Sinfelt in *Accounts of Chemical Research*, Vol. 10, No. 1, pages 15-20, January, 1977.

BIMETALLIC CATALYSTS: DISCOVERIES, CONCEPTS, AND APPLICATIONS. John H. Sinfelt, John Wiley & Sons, Inc., 1983.

**ПАУК-СКАКУН,
КОТОРЫЙ ПЛЕТЕТ
ЛОВЧИЕ СЕТИ**

THE PRINCIPAL EYES OF A JUMPING SPIDER HAVE A TELEPHOTO COMPONENT. David S. Williams and Peter McIntyre in *Nature*, Vol. 288, No. 5791, pages 578-580; December 11, 1980.

THE BIOLOGY OF *PORTIA FIMBRIATA*, A WEB-BUILDING JUMPING SPIDER (ARANEAE, SALTICIDAE) FROM QUEENSLAND: INTRASPECIFIC INTERACTIONS. R. R. Jackson in *Journal of Zoology*, in press.

Иванов А. В. ПАУКИ, ИХ СТРОЕНИЕ, ОБРАЗ ЖИЗНИ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА. — Л.: Издательство ЛГУ, 1965.

ОГОВОРКИ

COVERT FORMULATION AND EDITING OF ANOMALIES IN SPEECH PRODUCTION: EVIDENCE FROM EXPERIMENTALLY ELICITED SLIPS OF THE TONGUE. Michael T. Motley, Carl T. Camden and Bernard J. Baars in *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, Vol. 21, No. 5, pages 578-594; October, 1982.

EXPERIMENTAL VERBAL SLIP STUDIES: A REVIEW AND AN EDITING MODEL OF

Издательство
ФИНАНСЫ И СТАТИСТИКА
 предлагает:

Дж. Мердок
КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ

Перевод с английского

Контрольные карты — простой и надежный инструмент управления процессами крупносерийного промышленного производства. Внедрение контрольных карт в широкую практику — одно из важных средств повышения эффективности производства и качества продукции.

В книге доступно, с детальными числовыми примерами, рассказывается о контрольных картах американского статистика Шьюхарта и о кумулятивных кар-

тах. В предисловии к русскому изданию рекомендации автора сопоставляются с государственными стандартами, действующими в СССР.

Работа Дж. Мердока пригодится всем, кто применяет контрольные карты, внедряет их в практику или обучает тому, как это делать. Небольшой объем книги, доступность изложения и наличие необходимых таблиц позволяет использовать ее в качестве справочника.

1986 г., 12 л. Цена 90 к.

Книги издательства «Финансы и статистика» можно приобрести в книжных магазинах, распространяющих общественно-политическую литературу, и в магазинах — опорных пунктах.

Там же можно ознакомиться с планом выпуска литературы издательства на 1986 г.

Прием предварительных заказов на эти издания будет проводиться в пределах плановых тиражей, указанных в аннотированном плане.

Адреса магазинов — опорных пунктов:

375000, г. Ереван,
ул. Абовяна, 1/1, магазин № 43;

664023, г. Иркутск,
ул. Литвинова, 1, магазин № 1;

252004, г. Киев,
Красноармейская ул., 2, магазин № 43;

191186, г. Ленинград,
Невский прос., 28, магазин № 1, «Дом книги»;

127106, г. Москва,
Гостиничный проезд, 8, магазин № 99;

220050, г. Минск,
Ленинский просп., 19, магазин № 29 «Центральный»;

630097, г. Новосибирск,
Красный просп., 29, «Центральный Дом книги»;

223639, г. Рига,
ул. Ленина, 38, магазин «Политическая книга»;

330665, г. Ташкент,
ул. Пушкина, кв. Ц-1, корп. 6, магазин № 1.



LANGUAGE ENCODING. Michael T. Motley, Bernard J. Baars and Carl T. Camden in *Communication Monographs*, Vol. 50, No. 2, pages 79-101; June, 1983.

НАУКА ВОКРУГ НАС

CONTACT-ANGLE HYSTERESIS. T.D. Blake and J.M. Haynes in *Progress in Surface and Membrane Science*, Vol. 6, pages 125-138; 1973.

STREAM MEANDERS ON A SMOOTH HYDROPHOBIC SURFACE. Takeo Nakagawa and John C. Scott in *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 149, pages 89-99; December, 1984.

ON THE ABILITY OF DROPS OR BUBBLES TO STICK TO NON-HORIZONTAL SURFACES OF SOLIDS, PART 2: SMALL DROPS OR BUBBLES HAVING CONTACT ANGLES OF ARBITRARY SIZE, E.B. Dussan V. In *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 151, pages 1-20; February, 1985.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

THREE DEGREES ABOVE ZERO. Jeremy Bernstein. Charles Scribner's Sons, 1984.

STRUCTURE AND INTERPRETATION OF COMPUTER PROGRAMS. Harold Abelson, Gerald Jay Sussman and Julie Sussman. The MIT Press, 1985.

HARDWARE/SOFTWARE TRADE-OFFS FOR BITMAP GRAPHICS ON THE BLIT. Rob Pike, Bart Locanthi and John Reiser in *Software — Practice and Experience*, Vol. 15, No. 2, pages 131-151; February, 1985.

В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 21.10.85.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 1/4.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 5,25 бум. л.

Усл.-печ. л. 10,50.

Уч.-изд. л. 13,56.

Усл. кр.-отт. 42,36.

Изд. № 25/4206. Заказ 529.

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 издательства, полиграфии и книжной торговли. 127576, Москва, Илимская, 7

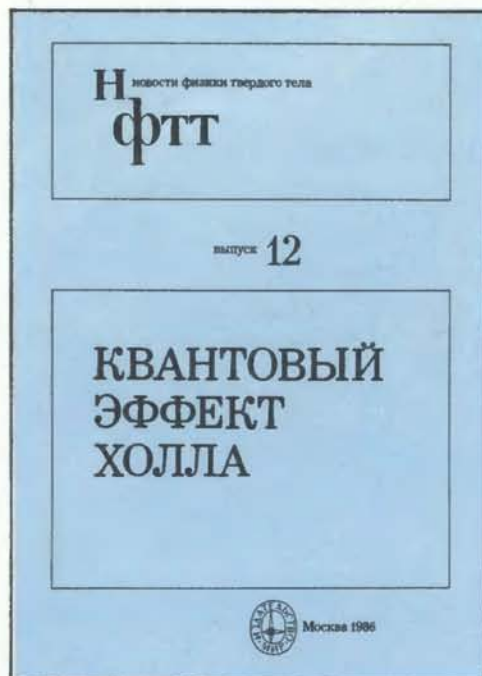


Издательство МИР предлагает:

КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА
СБ. СТАТЕЙ 1980—1984 ГГ.

Серия «Новости физики твердого тела»

Перевод с английского



Неугасающий интерес ученых всего мира к проблеме квантового эффекта Холла обусловлен тем, что это явление, которому пока еще не найдено адекватного теоретического объяснения, обнаруживает новые интересные особенности (например, дробное квантование), трактовка которых затрагивает фундаментальные проблемы современной квантовой физики. Интересно отметить, что квантовый эффект Холла уже нашел важное практическое применение — для создания эталона единицы электрического сопротивления и для измерения постоянной тонкой структуры с точностью, превышающей точность ее вычисления методами квантовой элек-

тродинамики. В сборник включено около 30 статей. Это статьи по экспериментальному исследованию квантового эффекта Холла, а также обзорные статьи по проблеме в целом и ряд наиболее важных работ по теории явления. Лишь одна основополагающая статья фон Клитцинга, Дорды и Пеппера относится к 1980 г., все остальные опубликованы в 1981—1984 гг. Аналогичных изданий на русском языке пока не имеется.

Для физиков-экспериментаторов, занимающихся явлениями переноса в твердом теле, для теоретиков, интересующихся проблемами квантовой физики, а также для студентов и аспирантов:

«Мир», 1986 Цена 2 р. 30 к.



В следующем номере:



МОЛЕКУЛЫ ЖИЗНИ

ДНК

РНК

БЕЛКИ

МОЛЕКУЛЫ КЛЕТОЧНОЙ МЕМБРАНЫ

МОЛЕКУЛЫ КЛЕТОЧНОГО МАТРИКСА

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ

МОЛЕКУЛЫ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ
МЕЖКЛЕТОЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ
ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

СТРАННЫЕ ВЕЩИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ С МАЯТНИКАМИ
ПРИ ИХ СОЕДИНЕНИИ ДРУГ С ДРУГОМ

ПРОГРАММЫ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ПРЕДМЕТНЫХ ГОЛОВЛОМОК