

В следующем номере:



МИКРОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ

СКОРОСТЬ РАСШИРЕНИЯ И РАЗМЕРЫ ВСЕЛЕННОЙ

ОШИБКИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ ЭВОЛЮЦИИ ЖИВОТНЫХ

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ КОРНИ АМЕРИКАНСКИХ ИНДЕЙЦЕВ

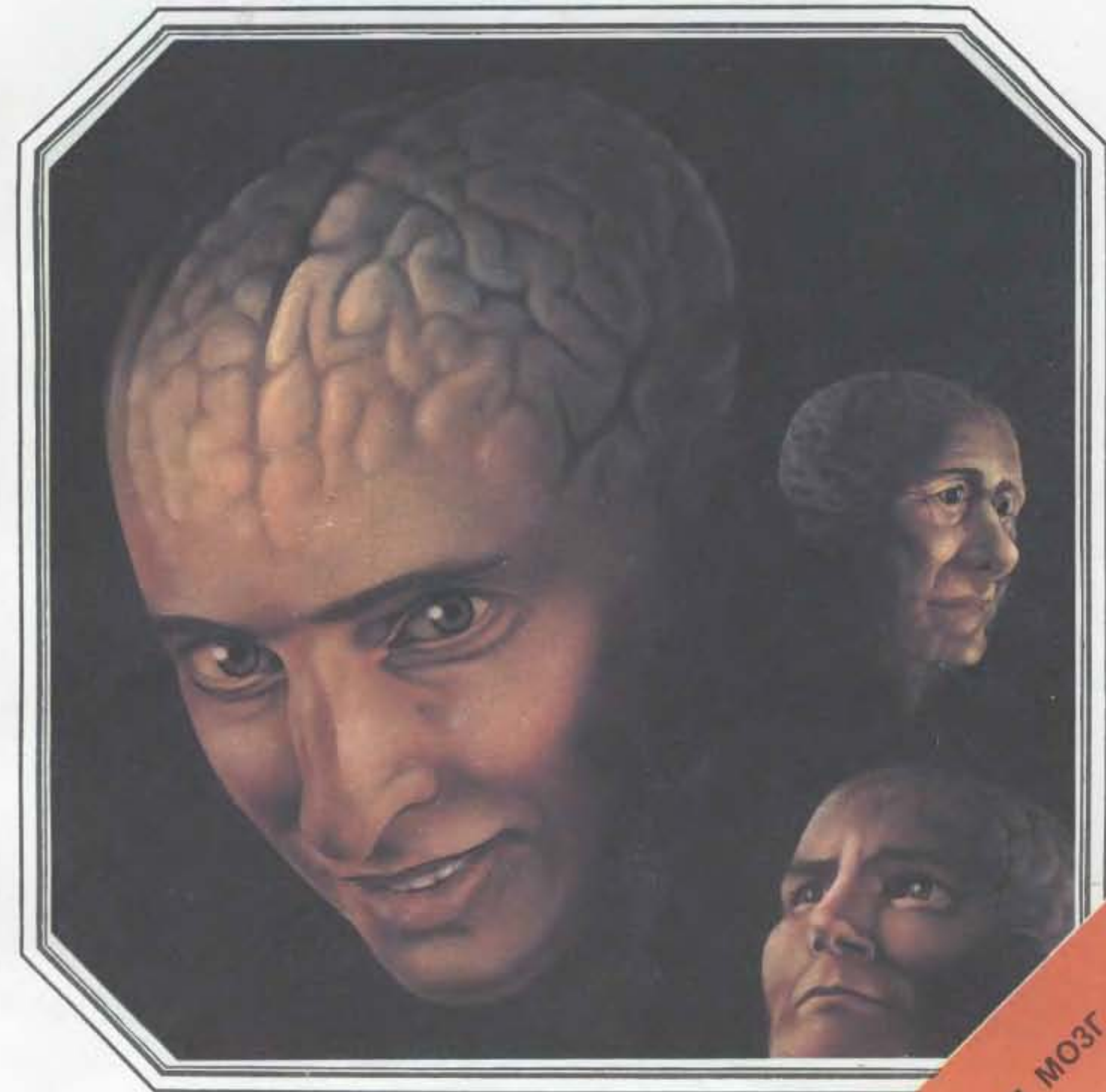
АСТРОНОМИЯ ВО ВРЕМЕНА КОЛУМБА

РЕФОРМА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Ноябрь **11** 1992

Декабрь **12** 1992

ПСИХИКА И МОЗГ

В номере:

СТАТЬИ (Scientific American, September 1992, Vol. 267, No. 3)



10 Психика и мозг

Джералд Д. Фишбах

Начинают появляться биологические объяснения сознания, памяти и других психических явлений; здесь дается общая оценка этого глубочайшего дерзновения науки



23 Развивающийся мозг

Карла Дж. Шатц

Основы разума закладываются в эмбриональный период развития мозга, когда формируются упорядоченные связи между миллиардами нейронов. В этом процессе решающую роль играют как активность самих нервных клеток, так и внешние факторы



33 Зрительный образ в сознании и в мозге

Семир Зеки

Анализируя различные атрибуты объектов, мозг констатирует видимый мир. Необычные формы слепоты демонстрируют, что происходит при нарушении работы определенных областей коры



43 Биологические основы обучения и индивидуальности

Эрик Р. Кэндел, Роберт Д. Хокинс

Сделанные недавно открытия говорят о том, что в основе обучения лежит совокупность простых процессов, изменяющих силу связей между нейронами головного мозга. Эти изменения играют важную роль в формировании неповторимой человеческой индивидуальности



55 Мозг и речь

Антониу Р. Дамазиу, Анна Дамазиу

Крупный комплекс нервных структур служит для представления в мозге понятий; комплекс меньшего размера формирует слова и предложения. Между двумя этими уровнями находится важный уровень, играющий роль посредника

**63 Оперативная память и разум***Патрисия С. Гольдман-Ракич*

Изучение анатомии и физиологии обезьян помогает понять, как действует нервный механизм формирования и корректировки внутренних представлений о внешнем мире. Такие представления лежат в основе человеческого мышления

**73 Половые различия в организации мозга***Дорин Кимура*

Особенности умственных способностей у мужчин и женщин отражают разное влияние гормонов на развитие мозга. Изучение этих особенностей и их причин может привести к более глубокому пониманию организации мозга

**83 Важнейшие психические расстройства и мозг***Эллиот С. Гершон, Роналд О. Ридер*

Шизофрения и маниакально-депрессивный психоз — наследственные заболевания, сопровождающиеся структурными и биохимическими изменениями в головном мозге. Гены, определяющие предрасположенность к ним, остаются неизвестными

**93 Стареющий мозг***Деннис Дж. Селко*

В конце жизни мозг человека страдает от износа некоторых нейронов и претерпевает химические изменения. Тем не менее у многих людей эти изменения не приводят к заметному снижению интеллекта

**103 Как обучаются нейронные сети***Джеффри Е. Хинтон*

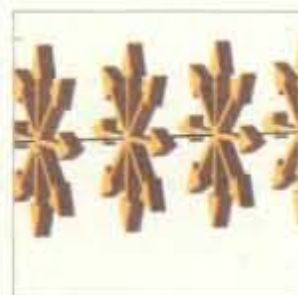
Сети из искусственных нейронов могут научиться представлять сложную информацию. Не исключено, что они помогут лучше понять, как обучается человеческий мозг

**113 Проблема сознания***Френсис Крик, Кристоф Кох*

Сегодня приблизиться к ее разрешению позволяют исследования зрительной системы. Этот подход требует тесного сотрудничества психологов и нейробиологов

*(Scientific American, October 1992, Vol. 267, No. 4)***122 Сколько видов населяет Землю?***Роберт М. Мэй*

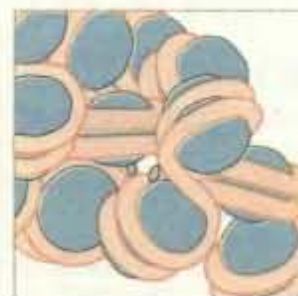
Ответа на этот вопрос никто не знает. Между тем он важен в связи с усилиями, направленными на сохранение биологического разнообразия, и мог бы способствовать решению ключевых проблем эволюции и рационального использования окружающей среды

**130 Квантовая криптография***Чарльз Г. Беннет, Жиль Brassar, Артур К. Экерт*

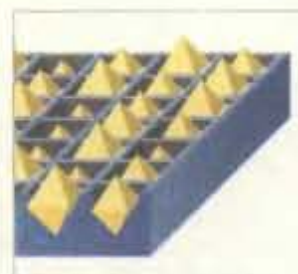
Уже несколько столетий математики пытаются найти такую систему кодирования информации, которая позволяла бы двум лицам обмениваться сообщениями абсолютно секретно. Заметный прогресс в этом направлении достигнут в последнее время за счет объединения квантовой механики с криптологией

**142 Горная болезнь***Чарльз С. Хьюстон*

Разнообразные, но коварные проявления этой нередко смертельной болезни укрощают многих покорителей вершин. Однако зачастую опасность можно предотвратить

**150 Гистоны как регуляторы генов***Майкл Гранстайн*

Когда-то гистоны считали всего лишь упаковочным материалом для ДНК. Оказалось же, что эти белки способны как подавлять, так и стимулировать активацию многих генов

**160 Полупроводниковые алмазные пленки***Майкл У. Гейс, Джон К. Ангус*

Тонкие пластинки алмаза, выращенные из газа при низком давлении и допированные специальными добавками, могут стать основой для создания электронных приборов нового поколения



168 Поющие гусеницы, муравьи и симбиоз

Филип Дж. Де Врис

«Пеннем» и химическими приманками гусеницы некоторых бабочек привлекают муравьев, превращая их в своих телохранителей. Те же самые муравьи обычно живут в симбиозе с другими насекомыми, а также с растениями



176 Гоминиды-падальщики и эволюция человека

Роберт Дж. Блюменшайн, Джон А. Кавалло

Хотя употребление мяса сыграло большую роль в формировании зубов, мозга и поведения человека, а также в развитии технологии изготовления каменных орудий, наши древнейшие предки, вероятно, в большей степени были падальщиками, чем охотниками



186 Тенденции развития образования

О реформе школьного образования в США

Тим Бердсли

Американская система обучения естественнонаучным дисциплинам в школах должна быть изменена кардинальным образом. На этом пути предстоит преодолеть немало трудностей

- РУБРИКИ**
- 7 Об авторах
 - 9, 199 50 и 100 лет назад
 - 20, 30, 41, 51, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 129, 139, 149, 158, 167, 175, 183, 196, 203, 207, 215 Наука и общество

- 200 Наука вокруг нас
- 204 Занимательная математика
- 213 Книги
- 217 Эссе
- 219 Библиография
- 222 Предметный указатель

SCIENTIFIC AMERICAN

Jonathan Piel
EDITOR

John J. Moeling, Jr
PUBLISHER

BOARD OF EDITORS

Alan Hall, Michelle Press
Timothy M. Beardsley
Elizabeth Corcoran
Deborah Erickson
Marguerite Holloway
John Horgan,

Philip Morrison (BOOK EDITOR)

Corey S. Powell
John Rennie, Philip E. Ross
Ricki L. Rusting, Russell Ruthen
Gary Stix, Paul Wallich
Philip M. Yam

Joan Starwood

ART DIRECTOR

Richard Sasso

VICE-PRESIDENT

PRODUCTION AND DISTRIBUTION

SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

John J. Hanley

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER

Dr. Pierre Gerckens

CHAIRMAN OF THE BOARD

Gerard Piel

CHAIRMAN EMERITUS

© 1992 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. Шенелева

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ

З. Е. Кожанова, О. К. Кудрявов,
Т. А. Румянцева, А. М. Смотров,
А. Ю. Краснопевцев, А. В. Белых

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ

О. В. Мошкова, М. В. Суrowова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

С. К. Аносов

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ФОТОАБОРА

В. С. Галкин

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР

А. В. Лыткина

КОРРЕКТОР

Н. Н. Старостина

ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ

М. Г. Жуков

ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ

В. В. Ефимов

АДРЕС РЕДАКЦИИ

129820, Москва, ГСП, 1-й Рижский пер., 2

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ

286.2588

© перевод на русский язык и оформление, «Мир», 1992

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Carol Donner

СТР.	АВТОРИСТОЧНИК	СТР.	АВТОРИСТОЧНИК	СТР.	АВТОРИСТОЧНИК
11	<i>Игра в прятки</i> (1940—42), Павел Челичев, предоставлено the Museum of Modern Art, N.Y.; Mrs. Simon Guggenheim Fund	39	Предоставлено Semir Zeki (<i>вверху</i>), D.F. Benson, Archives of Neurology (<i>внизу</i>)		
12	Janet Robbins, Harvard Medical School	42	Dan Wagner	44-45	Ian Worpole; Patricia J. Wynne
13	Carol Donner	46	Patricia J. Wynne	47-48	Ian Worpole
14	Tomo Narashima	49	<i>Mechanics of the Mind</i> , Colin Blakemore, © 1977 Cambridge University Press (<i>вверху</i>); Jared Schneidman (<i>внизу</i>)		
15	Patricia J. Wynne; предоставлено Clement Fox, Wayne State University, © Williams & Wilkins Co.	54	FPG International	56	Carol Donner
16-17	Marcus E. Raichle, Washington University School of Medicine	57	Department of Neurology, PET Facility and Image Analysis Facility, University of Iowa	58	Carol Donner
18	Apostolos P. Georgopoulos; © Society for Neuroscience	60	Marc Skinner	61	Patricia J. Wynne
22	<i>Behold Man</i> , by Lennart Nilsson, © 1973 Little, Brown and Company	62	Eric Hartman/Magnum	64-65	Patricia J. Wynne
24-25	Dana Burns-Pizer (<i>вверху</i>), Carla J. Shatz (<i>внизу</i>)	66	Patricia J. Wynne (<i>вверху</i>); Harriett Friedman, Patricia S. Goldman-Rakic (<i>внизу</i>)	67-68	Patricia J. Wynne
26-27	Dana Burns-Pizer	72	<i>The Old Oaken Bucket</i> , Grandma Moses, © 1987 Grandma Moses Properties Co., N.Y.	74-75	Jared Schneidman
28-29	Guilbert Gates/JSD (<i>вверху</i>), Carla J. Shatz (<i>внизу</i>)	76-79	Jared Schneidman	82	Предоставлено Edward Adamson and John Timlin, © 1990
32	Фото Robert Prochnow; живопись Richard Tobias, предоставлено Brooke Alexander, N.Y.				
34	Carol Donner (<i>вверху слева и внизу</i>), Semir Zeki (<i>вверху справа</i>)				
35	Guilbert Gates/JSD, Jared Schneidman				
36	Guilbert Gates/JSD				
38	Semir Zeki (<i>вверху</i>),				

СТР.	АВТОРИСТОЧНИК	СТР.	АВТОРИСТОЧНИК	СТР.	АВТОРИСТОЧНИК
84	Nancy C. Andreason, University of Iowa	124	Bettmann Archive (вверху), Jana Brenning (внизу)		Oak Ridge National Laboratory
85	Monte S. Buchsbaum, University of California at Irvine	125	Jana Brenning	171	Jared Schneidman
86	Ian Worpole	126	Johnny Johnson (графики), Jana Brenning (рисунки)	172	Guilbert Gates/JSD (вверху), Jared Schneidman (внизу)
88	Carol Donner	127	Guilbert Gates/JSD	173	Guilbert Gates/JSD
92	FPG International	128	Kathleen Katims/JSD	176, 177	Patricia J. Wynne
93	Carol Donner (рисунки); Johnny Johnson (график)	131	Robert Prochnow	178	Robert J. Blumenschine
95	Dorothy G. Flood, Paul D. Coleman, University of Rochester (фотографии и рисунки); Johnny Johnson (график)	132	Courtesy of David Kahn, © 1983 Macmillan Publishing Company	179	Leonard Lee Rue/Bruce Coleman, Inc. (фотография), Patricia J. Wynne (рисунки)
96	Johnny Johnson	133-137	Michael Goodman	180	Patricia J. Wynne
98	Dennis J. Selkoe (вверху); Robert P. Friedland, Case Western Reserve University; предоставлено <i>Clinical Neuroimaging</i> , © 1988 John Wiley and Sons, Inc. (внизу)	143	Galen Rowell/Mountain Light Photography	181	Johnny Johnson (график), Patricia J. Wynne (рисунки)
99	Johnny Johnson (график); Ralph Warren Landrum, University of Kentucky (фотография)	144	Patricia J. Wynne (вверху), Carol Donner (внизу)	182	John A. Cavallo
102	Tomo Narashima	145, 146	Patricia J. Wynne	186, 187	Richard Nowitz, © National Geographic Society
104	Laurie Grace	151	Timothy J. Richmond, Library of the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich	188	Johnny Johnson
105	Geoffrey E. Hinton	152	Ian Worpole; Barbara A. Hamkalo, University of California, Irvine (фотографии)	190	Randy Santos/Randolf Photography
107-109	Laurie Grace	154, 155	Ian Worpole	191	Robert Prochnow
112	<i>Reproduction Prohibited (портрет Э. Джеймса)</i> , René Magritte, © 1992 Herscovici/Artist Rights Society	156	Stephen J. Kron and Gerald R. Fink, Whitehead Institute (вверху), Ian Worpole (внизу)	192, 193	Lois S. Kim, St. Andrew's School (слева), Max Aguilera-Hellweg (справа)
115	Bettmann Archive	157	Ian Worpole	194	Randy Santos/Randolf Photography
116-117	Jason Goltz	161-163	Philip J. DeVries	204-206	Jana Brenning
118	Johnny Johnson	164	Philip J. DeVries (слева), Jason Goltz (справа)		
119	Jason Goltz	165	Patricia J. Wynne		
122, 123	<i>The Terrestrial Paradise</i> , by Jan Brueghel the Elder, Museo Lazara Galdiano/Art Resource	166	Johnny Johnson (диаграмма), Patricia J. Wynne (рисунки)		
		169	Jared Schneidman		
		170	Robert Clausing,		

Об авторах

Gerald D. Fischbach "Mind and Brain" (ДЖЕРАЛД Д. ФИШБАХ «Психика и мозг») — профессор, заведующий кафедрой нейробиологии в Медицинской школе Гарвардского университета и в Массачусетской больнице общего типа. В 1960 г. окончил Университет У. Колгейта в Гамильтоне (шт. Нью-Йорк). В 1965 г. получил степень доктора медицины в Медицинской школе Корнеллского университета. В 1978 г. в Гарварде ему была присвоена почетная степень магистра искусств. Фишбах — член Национальной академии наук США, Американской академии искусств и наук. Работает также в Национальном институте медицины. Был президентом Нейробиологического общества; в настоящее время он член правления нескольких научных фондов и ряда университетских консультативных комитетов.

Carla J. Shatz "The Developing Brain" (КАРЛА ДЖ. ШАТЦ «Развивающийся мозг») — профессор нейробиологии в Калифорнийском университете в Беркли; до этого в течение многих лет работала в Станфордском университете. Училась в Радклифф-Колледже, получила степень магистра в Медицинском колледже Лондонского университета, степень доктора философии — в Медицинской школе Гарвардского университета. За свои исследования развития межклеточных связей в зрительной системе у млекопитающих она удостоена множества почестей, в частности, недавно избрана в члены Американской академии искусств и наук.

Semir Zeki "The Visual Image in Mind and Brain" (СЕМИР ЗЕКИ «Зрительный образ в сознании и в мозге») — профессор нейробиологии Лондонского университета. Получил докторскую степень в Медицинском колледже этого университета, после чего работал в Национальном институте психического здоровья в Вашингтоне и в Висконсинском университете в Мадисоне, а также читал лекции в некоторых других американских и европейских университетах. Его всегда интересовали анатомия и функциональная организация зрительной коры у обезьян, а в последнее время и у человека.

Eric R. Kandel, Robert D. Hawkins "The Biological Basis of Learning and Individuality" (ЭРИК Р. КЭНДЕЛ, РОБЕРТ Д. ХОКИНС «Биологические основы обучения и индивидуальности») сотрудничают в области ней-

робиологии обучения. Кэндел получил степени бакалавра по гуманитарным наукам в Гарвард-Колледже и доктора медицины в Медицинской школе Нью-Йоркского университета. Изучал психиатрию в Медицинской школе Гарвардского университета. В настоящее время он профессор в Колледже терапии и хирургии Колумбийского университета, а также старший научный сотрудник в Медицинском институте Говарда Хьюза. Хокинс имеет степень бакалавра по гуманитарным наукам, присвоенную в Станфордском университете, и степень доктора философии в области экспериментальной психологии, полученную в Калифорнийском университете в Сан-Диего. Сейчас он доцент в Центре нейробиологии и этологии Колумбийского университета.

Antonio R. Damasio, Hanna Damasio "Brain and Language" (АНТОНИУ Р. ДАМАЗИУ, АННА ДАМАЗИУ «Мозг и речь») в течение последних двадцати лет изучали нервную основу речи и памяти. Антониу — профессор, глава неврологического факультета Медицинского колледжа Университета шт. Айова и доцент Солдовского института биологических исследований в Сан-Диего. Получил диплом медика и докторскую степень в Лиссабонском университете. Анна Дамазии стала доктором медицины там же. Сейчас она профессор неврологии и руководитель лаборатории нейровизуализации и нейроанатомии человека в Университете шт. Айова.

Patricia S. Goldman-Rakic "Working Memory and the Mind" (ПАТРИСИЯ С. ГОЛЬДМАН-РАКИЧ «Оперативная память и разум»). Свою научную карьеру посвятила изучению нейробиологии памяти и другой умственной деятельности. Степень доктора философии получила в 1963 г. в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе и через два года стала сотрудником Национального института психического здоровья. В 1979 г. перешла в Медицинскую школу Йельского университета, где в настоящее время она профессор неврологии. Одновременно Гольдман-Ракич является членом многих национальных консультативных советов и Национальной академии наук. В последние годы она была президентом Неврологического общества США. Научная деятельность Гольдман-Ракич сейчас связана с исследованием нервных механизмов высших функций мозговой коры у приматов.

Doreen Kimura "Sex Differences in the Brain" (ДОРИН КИМУРА «Половые различия в организации мозга») исследует нервную и гормональную основу умственной деятельности человека. Она — профессор психологии и почетный лектор кафедры клинической неврологии в Университете Западного Онтарио в Лондоне (Канада). Кимура член Королевского общества Канады; получила в 1992 г. премию Джона Дьюана от Фонда психического здоровья пров. Онтарио.

Elliot S. Gershon, Ronald O. Rieder "Major Disorders of Mind and Brain" (ЭЛЛИОТ С. ГЕРШОН, РОНАЛД О. РИДЕР «Важнейшие психические расстройства и мозг») начали сотрудничать в изучении психических заболеваний в рамках одной из исследовательских программ, осуществляемых в Национальном институте психического здоровья (NIMH). Гершон возглавляет клинические нейрогенетические исследования и специализируется в областях популяционной генетики и молекулярной генетики нормального и аномального поведения. В 1965 г. он закончил Медицинскую школу Гарвардского университета, затем изучал психиатрию в Массачусетском центре психического здоровья и в 1969 г. перешел в NIMH. Ридер закончил Медицинскую школу Гарвардского университета в 1968 г. и изучал психиатрию в Медицинском колледже им. А. Эйнштейна. В NIMH он занимается изучением шизофрении. В настоящее время Ридер руководит научными исследованиями, а также обучением врачей-психиатров в Колумбийском университете.

Dennis J. Selkoe "Aging Brain, Aging Mind" (ДЕННИС ДЖ. СЕЛКО «Стареющий мозг») — один из директоров Центра неврологических заболеваний больницы Бриггса и Уимена в Бостоне, а также профессор неврологии и нейробиологии Медицинской школы Гарвардского университета. Селко получил степень доктора медицины в Виргинском университете. В 1988 г. он был удостоен почетной награды Национального института геронтологии за изучение болезни Альцгеймера. Это его вторая статья в журнале "Scientific American".

Geoffrey E. Hinton "How Neural Networks Learn from Experience" (ДЖЕФФРИ Е. ХИНТОН «Как обучаются нейронные сети») — последние 20 лет работает в области представления информации и обучения искусственных нейронных сетей. В 1978 г. защитил докторскую диссертацию по искусственному интеллекту в Эдинбургском университете. В настоящее время он

научный сотрудник в Канадском институте перспективных исследований, а также профессор информатики и психологии в Торонтском университете.

Francis Crick and Christof Koch "The Problem of Consciousness". (ФРЕНСИС КРИК, КРИСТОФ КОХ «Проблема сознания») — занимаются экспериментальным изучением сознания. Крик является соавтором открытия (вместе с Джеймсом Уотсоном) двуспиральной структуры ДНК. Работая в Лаборатории молекулярной биологии Совета медицинских исследований в Кембридже, занимался генетическим кодом и биологией развития. С 1976 г. работает в Солковском институте биологических исследований в Сан-Диего. Основное направление исследований Крика — зрительная система млекопитающих. Кох получил степень доктора философии в области биофизики в Тюбингском университете. Четыре года работал в Массачусетском технологическом институте, затем перешел в Калифорнийский технологический институт, где в настоящее время он ассистент в Лаборатории нейросистем и вычислительной техники. Исследует способность отдельных клеток мозга перерабатывать информацию, а также нервный субстрат восприятия движения, зрительного внимания и сознания. Кроме того, Кох разрабатывает аналоговые сверхбольшие интегральные схемы машинного зрения для систем искусственного интеллекта.

Robert M. May "How Many Species Inhabit the Earth?" (РОБЕРТ М. МЭЙ «Сколько видов населяет Землю?») с 1989 г. занимает должность профессора Королевского общества в Оксфордском университете и в Имперском колледже в Лондоне. Учился в Сиднейском университете по специальности теоретическая физика. В начале 1970-х годов Мэй заинтересовался проблемами динамики численности популяций животных и зависимостью между стабильностью и сложностью природных сообществ. В 1977 г. перешел в Принстонский университет, где занимал должности профессора зоологии и вице-президента по научным исследованиям. В настоящее время Мэй занимается изучением факторов, оказывающих влияние на разнообразие и обилие видов, в частности эволюционными взаимодействиями между паразитами и их хозяевами.

Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Artur K. Ekert "Quantum Cryptography" (ЧАРЛЗ Г. БЕННЕТ,

ЖИЛЬ БРАССАР, АРТУР К. ЭКЕРТ «Квантовая криптография») первыми выполнили работы в области квантовой криптографии. Беннет с 1973 г. занимается научной работой в Исследовательском центре им. Томаса Дж. Уотсона фирмы ИБМ в Йорктаун-Хайтсе (шт. Нью-Йорк). Брассар в 1979 г. получил звание профессора информатики в Монреальском университете, в настоящее время он член Общества памяти Э. Стиси. Экерт в прошлом году в Оксфордском университете защитил диссертацию на степень доктора наук и сейчас работает младшим научным сотрудником в Мертон-колледже в Оксфорде. Все авторы проявляют глубокий интерес к фундаментальной связи физики с информатикой и вычислительной техникой. Это уже третья статья Беннета для журнала «Scientific American».

Charles S. Houston "Mountain Sickness" (ЧАРЛЗ С. ХЬЮСТОН «Горная болезнь») — врач, полюбивший горы со времен своего первого восхождения в Альпах в 1925 г. В 1936 г. поднимался на Гималаи, а в 1938 г. возглавил первую Американскую экспедицию на пик К2 (7900 м). После защиты докторской диссертации в Университете шт. Колумбия в Хьюстоне служил авиационным хирургом в ВМС США и специализировался в области высотной медицины. Хьюстон, изучавший терапию в Вермонтском университете, продолжает заниматься медицинскими исследованиями, связанными с большими высотами.

Michael Grunstein "Histones as Regulators of Genes" (МАЙКЛ ГРАНСТАЙН «Гистоны как регуляторы генов») — профессор молекулярной биологии в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе, где работает с 1975 г. Родился в Румынии. Степень бакалавра получил в 1967 г. в Университете Макчилла, докторскую степень в области молекулярной биологии — в 1971 г. в Эдинбургском университете, после чего работал на кафедрах медицины и биохимии Станфордского университета.

Michael W. Geis, John C. Angus "Diamond Film Semiconductors" (МАЙКЛ У. ГЕЙС, ДЖОН К. АНГУС «Полупроводниковые алмазные пленки») занимаются исследованием механизма осаждения алмазных пленок и изучением их свойств. Гейс работает в Лаборатории им. Линкольна Массачусетского технологического института, где он разработал алмазные транзисторы и методы травления схемных рисунков на алмазных

кристаллах. Степень доктора в области физики космоса и астрономии получил в 1976 г. в Университете Райса. Ангус уже более 25 лет занимается проблемой выращивания алмазов. В 1971 г. вместе со своими сотрудниками из Университета Кейс-Вестерн-Резерв в Кливленде он синтезировал первые полупроводниковые алмазные пленки. Степень доктора в области промышленной химии получил в 1960 г. в Мичиганском университете.

Philip J. DeVries "Singing Caterpillars, Ants and Symbiosis" (ФИЛИП ДЖ. ДЕ ВРИС «Поющие гусеницы, муравьи и симбиоз») интересуется многими вопросами эволюции, экологии, сравнительной биологии и естественной истории, особенно взаимодействиями растений с животными, главным образом с насекомыми. Он старший научный сотрудник отделения зоологии Техасского университета в Остине и консультант в Центре охраны природы Станфордского университета. Окончив Мичиганский университет в 1975 г., Де Врис стал аспирантом Техасского университета и в 1987 г. получил докторскую степень. Его профессиональные заслуги отмечены стипендией Фонда Макартура.

Robert J. Blumenshine, John A. Cavallo "Scavenging and Human Evolution" (РОБЕРТ ДЖ. БЛЮМЕНШАЙН, ДЖОН А. КАВАЛЛО «Гоминиды-падальщики и эволюция человека») — оба работают в Университете Ратгерса, где проводят совместные исследования жизни ранних гоминидов. Блюменшайн, адъюнкт-профессор антропологии, специализируется на изучении рациона гоминидов и способов добывания ими пищи. Он является содиректором программы исследований в ущелье Олдувай (Танзания), а также проводит археологические исследования в Эфиопии и в Индии. Кавалло возглавляет Центр археологии при Университете Ратгерса. В настоящее время изучает поведение леопардов в Национальном парке Серенгети (Танзания). До этого изучал экономику охотников и рыболовов американских индейцев в доисторический период.

Drew van Camp "Neurons for computers" (ДРЮ ВАН КЭМП «Нейроны для компьютеров») — программист и научный сотрудник в Торонтском университете. Специализируется на создании моделей нейронных сетей для различных приложений.

Michael Schulhof "Essay: Why Business Needs Scientists" (МАЙКЛ ШУЛХОФ «Эссе») — вице-председатель компании Sony USA и президент компании Sony Software.

50 и 100 лет назад



СЕНТЯБРЬ 1942 г. «Еще несколько лет назад утверждение о том, что туманность Ориона частично состоит из железа, показалось бы невероятным. Недавно Уайз ясно наблюдал уже 10 запрещенных спектральных линий Fe II и около 15 линий Fe III, так что относительно этого сейчас уже нет никаких сомнений. Между тем вся «неожиданность» данного утверждения была снята одним, еще более замечательным открытием, заключающимся в том, что атомы железа составляют часть газа, распределенного повсеместно в межзвездном пространстве. Год от года очевидность всеобщей однородности состава материи во всех областях космоса, доступных нашему наблюдению, становится все более и более явной».

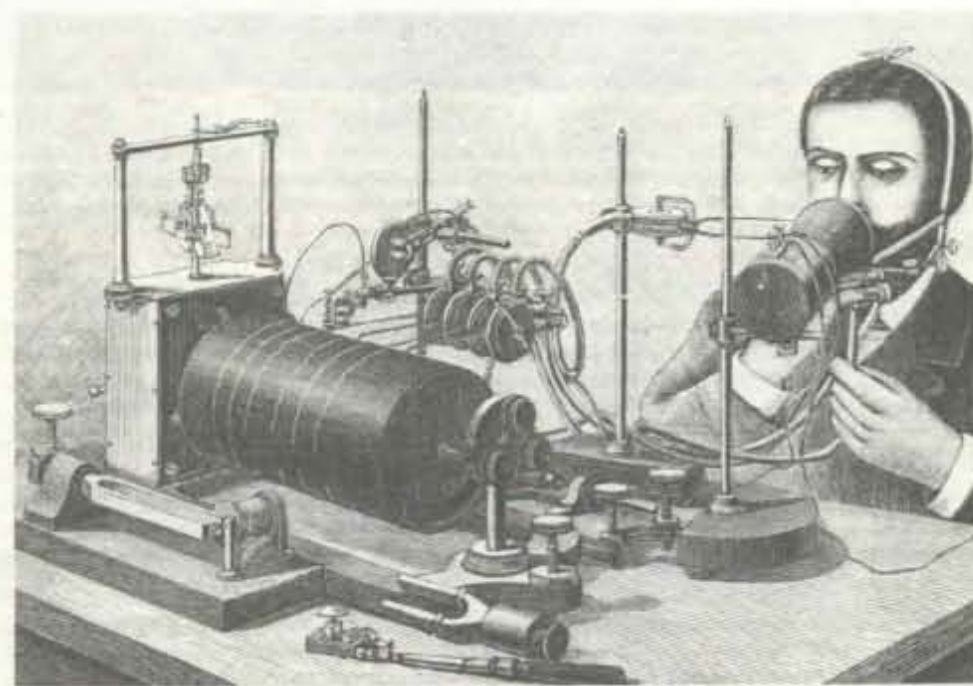
«У многих людей (гемофиликов) происходит обильное кровотечение даже от незначительных ран, потому что их кровь содержит слишком мало вещества, вызывающего свертывание крови (протромбина). Ранее не был известен ни один удовлетворительный метод остановки кровотечения у людей, страдающих такой болезнью, и даже удаление зуба у них было сопряжено с серьезным риском для жизни. Новый глобулин, вызывающий свертывание, обеспечивает присутствие в крови составляющей, которой нет у гемофиликов, и является для медиков и дантистов эффективным средством остановки крови вследствие незначительных ран в течение нескольких секунд».

«Недавно было описано необычное ощущение, которое временами испытывают пилоты, называемое «ложным креном». Вот чем оно вызывается. Во время полета медленный поперечный наклон самолета не ощущается. Когда же, наконец, его наклон становится достаточно явным для того, чтобы пилот его заметил, он корректирует положение самолета намного быстрее по сравнению со временем, в течение которого накапливался этот наклон. А человеческое ухо устроено таким образом, что оно легко «отмечает» именно быстрое ускорение, а не медленное. Так что в конечном счете у пилота возникает ощущение, что самолет теперь нахренился в противоположную сторону».



СЕНТЯБРЬ 1892 г. «Для того чтобы проверить цепкость руки младенца, д-р Льюис Робинсон коснулся пальцем ладони ребенка. Прикосновение тотчас вызвало явно чисто рефлекторное сжатие руки ребенка, причем не было почти никакой разницы между тем, когда он спал и когда бодрствовал. Затем д-р Робинсон медленно, но с легким подергиванием поднял палец и к своему удивлению обнаружил, что ребенок сильнее сжал свою руку и позволил приподнять себя с кровати. Во многих случаях новорожденный может висеть таким образом, легко удерживая свое тело в «подвешенном состоянии» в течение минуты. Еще более удивительным был тот факт, что нередко ребенок, по-видимому, совсем не возражал против такого эксперимента. Среди новорожденных отпрысков рода человеческого эти качества применения не находили. Поэтому представляется правильным сделать вывод о том, что поразительная цепкость рук современного ребенка является отголоском тех привычек, которые на протяжении многих эпох спасали прародителей, обитавших на деревьях, от неминуемой гибели в пору младенчества».

«Недавнее побитие рекорда рысистых бегов, когда кобыла Нэнси Ханкс показала время 2 мин 5¼ с,



Фонетический самописец аббата Руссло

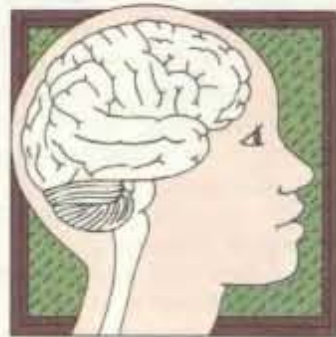
пробежав одну милю, стало замечательным подтверждением математического закона, который соблюдался с точностью до долей секунды на протяжении последних 62 лет. Согласно этому закону, время, необходимое лошади для того, чтобы пробежать 1 милю рысью, снижается каждый год на 11/26 с. Руководствуясь этим законом, можно вычислить, что в 2047 г. будет достигнута скорость бега, составляющая 1 милю в минуту, и еще 297 лет понадобятся для того, чтобы заставить рысаков пробегать эту дистанцию со скоростью молнии».

«Аббат Руссло, профессор Кармелитской школы, преуспел в создании серии аппаратов, необходимых для последовательной регистрации движений, в своей совокупности составляющих слово или фразу. Очевидно, всякий раз, когда по какой-либо причине воздух, находящийся в резиновой трубке, начинает выбривать, его колебания будут передаваться воздуху в барабане, и после этого резина, а также пластина и рычаг будут приходить в движение. Если цилиндр будет при этом вращаться, линия, прочерчиваемая на нем концом рычага, будет не прямой, а «отслеживающей» вибрации. В будущем станет возможным фиксировать таким образом произношение на любом языке, диалекте или наречии, не полагаясь на слуховое восприятие, при котором не различаются легкие расхождения в манере произношения различных людей».

Начинают появляться биологические объяснения сознания, памяти и других психических явлений; здесь дается общая оценка этого глубочайшего дерзновения науки

ДЖЕРАЛД Д. ФИШБАХ

СЕГОДНЯ утром Руфь учила меня уму-разуму. Я, разумеется, очень ей за это признателен, но куда его деть и, коли уж на то пошло, что это такое, честно говоря, не знаю. Вроде бы императивами ведает лимбическая система, а географические сведения хранятся в гиппокампе, но я в том совсем не уверен. Рене Декарта тоже волновала эта проблема. Три столетия назад он описал разум как внетелесную сущность, проявляющуюся через шишковидную железу. Насчет шишковидной железы (эпифиза) Декарт ошибался, но вызванный им спор о взаимосвязи между разумом, а точнее, психикой и мозгом, бушует и по сей день. Каким же образом невещественная психика влияет на мозг, а мозг — на психику?



Обращаясь к этой теме, Декарт находился в невыгодном положении. Он не ведал, что человеческий мозг — самая сложная в обозримом мире структура, способная и координировать движения пальцев играющего пианиста, и породить объемный ландшафт из падающего на плоскую сетчатку света. Не знал, что механизмы мозга формируются и поддерживаются под влиянием как генов, так и опыта. И уж наверняка не было ему известно, что существующий ныне вариант мозга — результат многих миллионов лет эволюции. Мозг трудно понять потому, что в отличие от компьютера создавался он без каких бы то ни было определенных целей или схем, а вследствие естественного отбора — главной движущей силы эволюции.

Знай Декарт обо всем этом, он, как и современные нейробиологи, возможно, задался бы вопросом, достаточно ли сложен устроен мозг, чтобы скрывать в себе все тайны человеческого воображения, памяти и настроений? Философские размышления, однако, нелишние подкреплять экспериментами, вопрос о настоятельной необходимости, дерзновенности и увлекательности которых стоит сегодня в науке остро, как никакой другой. Выживание человечества, а быть может, и всей нашей планеты зависит от того, насколько хорошо будет понята человеческая психика. Если мы согласимся, что психика — это совокупность происходящих в мозге процессов, а не материальная или духовная субстанция, вопрос о необходимости в эмпирических исследованиях становится яснее. В самом деле, в данном контексте прилагательные — психические процессы, умственная деятельность — звучат все-таки менее провокационно, чем существительные — психика, разум.

Авторы статей, представленных в этом специальном выпуске «В мире науки», и их коллеги стремились отыскать нервный субстрат психических феноменов. Они считают, что психические события можно поставить в соответствие с паттернами нервных импульсов в мозге. Для того чтобы в полной мере понять смысл этого мнения и оценить его значение, нужно разобраться, как работают нейроны (нервные клетки), как они между собой взаимодействуют, как организованы в локальные или рассеянные по всему мозгу сети и как с индивидуальным опытом изменяются межнейронные связи. Важно также дать четкое

определение тем психическим явлениям, которые требуется объяснить. На каждом уровне этого анализа достигнуты значительные успехи. Начинают выясняться захватывающие корреляции между психическими свойствами и паттернами нервных импульсов, вспыхивающих и затухающих где-то в мозге...

САМОЕ внешне поразительное в человеческом головном мозге — большие и на первый взгляд абсолютно симметричные его полушария, надетые на своего рода сердечник, доходящий до спинного мозга. Складчатые полушария покрыты богатой клетками слоистой корой толщиной 2 мм. По функциональным и морфологическим критериям мозговую кору можно разделить на множество зон, воспринимающих сенсорную (чувствительную) информацию, зон моторного (двигательного) контроля и менее четких зон, в которых протекают ассоциативные процессы. Как полагают многие исследователи, в этих-то зонах интерфейса между входом и выходом и должен осуществляться великий синтез психической жизни.

Однако все может обстоять не так просто. Психику (англ. mind) нередко отождествляют с сознанием (consciousness) — субъективным чувством самоотчета, самоосознания. Но если представление о «неусыпной сердцевине», опосредующей ощущения и движения, вполне правомочная метафора, то нет никаких априорных предпосылок приписывать сознанию какую-либо определенную локализацию или даже говорить об этом глобальном осознании как о некоей физиологически единой сущности. Кроме того, психика — нечто большее, чем сознание или мозговая кора. Побуждения, настроения, желания и подсознательные формы обучения в широком смысле суть психические феномены. Мы не зомби. Эмоциональные реакции зависят от функционирования нейронов точно так же, как и сознательные мысли.

НО ВЕРНЕМСЯ к головному мозгу, который сразу предстает в своей необычайной сложности. Головной мозг человека весит всего от 1,3 до 1,8 кг, но содержит около 100 млрд. нейронов. И хотя это число огромно — по порядку величины оно сравнимо с числом звезд в Млечном Пути, — сложности головного мозга одним только им не объяснить. В печени имеется, по всей видимости, около 100 млн. клеток, но, будь у человека 1000 печеней, его внутренняя жизнь богаче не делается.

Отчасти эта сложность связана с разнообразием нервных клеток, которые отец современной науки о мозге, Сантьяго Рамон-и-Кахаль, назвал «загадочными бабочками души, чьи крылья бьются в один прекрасный день — как знать? — прольет свет на тайны психической жизни». Около ста лет назад он осуществил свои фундаментальные исследования зрелых и эмбриональных нейронов, начав их благодаря тому, что натолкнулся на метод окраски нейронов солями серебра, разработанный Камилло Гольджи.



КАРИНА «ИГРА В ПРЯТКИ» (1940—1942) Павла Челичева прекрасно передает то взаимодействие между психикой и окружающей средой, которое влияет на развитие мозга и его архитектуру. Неясные очертания прячущихся фигур —

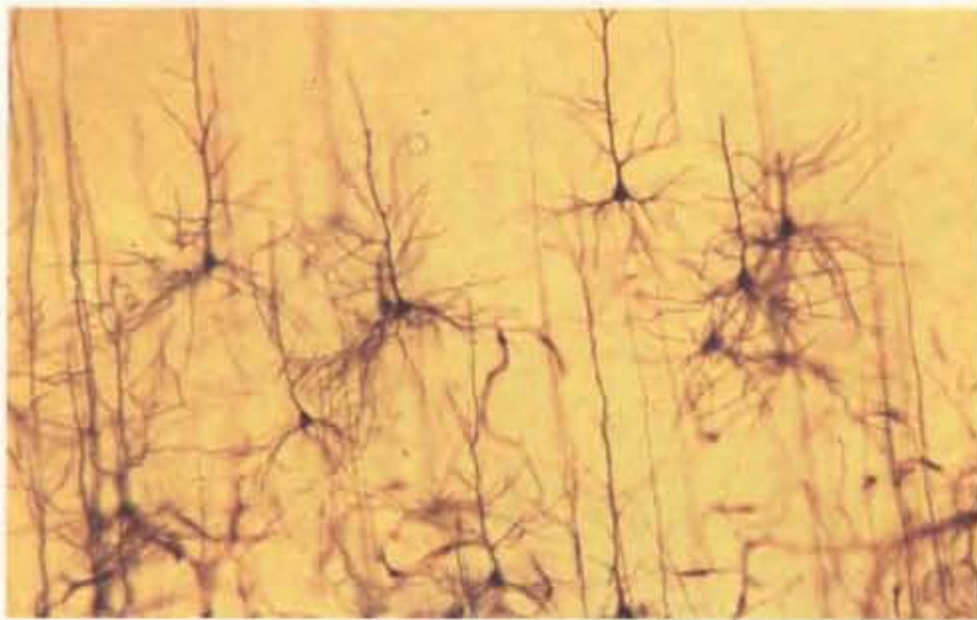
это своего рода тонкий образ психических функций. Корни и переплетающиеся стебли символизируют ветвления нейронов и их способность к пластическим изменениям.

Огромное преимущество этой техники, привнесенной Кахалем к созданию нейронной доктрины, состоит в том, что серебро, полностью пропитывая одни клетки, в большинстве других не проникает. Так за лесом стали выявляться отдельные деревья. А увидев их, Кахаль тотчас понял, что мозг образован дискретными единицами, а не непрерывной сетью. Он описал нейроны как поляризованные клетки, которые получают сигналы сильно разветвленными отростками, получившими названия дендритов, а посылают информацию неразветвленными отростками, названными аксонами. Окрашивание по Гольджи позволило выявить огромное разнообразие

нейронов по форме тела клетки, дендритного «дерева» и длины аксонов. Кахаль провел и фундаментальное различие между клетками с короткими аксонами, взаимодействующими с соседними нейронами, и клетками с длинными аксонами, проецирующимися (т. е. посылающими сигналы) в другие участки мозга.

Но форма не единственный источник различий между нейронами. Если учитывать молекулярные особенности, разнообразие нейронов представляется еще более значительным. Все клетки организма содержат один и тот же набор генов, но в каждой клетке экспрессируется (т. е. находится в активном состоянии, при кото-

ром синтезируется продукт, кодируемый данным геном) лишь небольшая часть этих генов. В мозге избирательная генная экспрессия обнаружена в таких на первый взгляд гомогенных популяциях нейронов, как амакриновые клетки в сетчатке, клетки Пуркинье в мозжечке и мотонейроны в спинном мозге. Помимо структурных и молекулярных особенностей еще более тонкие различия между нейронами выявляются при изучении их входов (т. е. совокупности поступающих сигналов и аппарата их приема) и проекций (т. е. совокупности посылаемых сигналов и аппарата их передачи). А быть может, каждый нейрон уникален? Но это, несомненно, не



НЕЙРОНЫ, выявляемые с помощью окрашивания по Гольджи, передают нервные импульсы. Клеточную архитектуру мозга впервые описал Сантьяго Рамон-и-Кахаль. (Препарат, представленный на рисунке, получен Дж. Роббинс из лаборатории Д. Хьюбела в Медицинской школе Гарвардского университета.)

так, за исключением самых тривиальных случаев. Тем не менее нельзя игнорировать тот факт, что компоненты, из которых построен мозг, не взаимозаменяемы.

На фоне такого обезкураживающего разнообразия понимание облегчается возможностью упрощения. Несколько лет назад В. Маунткэсл, изучая соматосенсорную кору, а также Д. Хьюбел и Т. Визел, занимавшиеся зрительной корой, сделали важное открытие. Они обнаружили, что нейроны с одинаковыми функциями сгруппированы в виде колонок, или столбиков, пронизывающих толщу коры. В зрительной коре такой типичный модуль, клетки которого реагируют на линии определенной ориентации, имеет в поперечнике около 0,1 мм. Модуль может включать более 100 тыс. клеток, огромное большинство которых образует локальные нейронные сети, выполняющие ту или иную специфическую функцию.

Другое упрощение состоит в том, что все нейроны проводят информацию в общем одинаково. Информация передается по аксонам в виде коротких электрических импульсов, называемых потенциалами действия — это биения крыл бабочек Кахалья. Потенциалы действия, амплитуда которых составляет около 100 мВ, а длительность 1 мс, возникают в результате движения положительно заряженных ионов натрия через поверхностную клеточную мембрану из внеклеточной жидкости внутрь клетки, в ее цитоплазму.

Концентрация натрия в межклеточном пространстве примерно в 10 раз

больше внутриклеточной его концентрации. В состоянии покоя поддерживается трансмембранная разность потенциалов около -70 мВ (цитоплазма заряжена отрицательно относительно внешней среды). При этом ионы натрия проникают в клетку медленно, так как доступ туда для них ограничен свойствами мембраны. Физическая или химическая стимуляция, деполаризирующая мембрану, т. е. снижающая разность потенциалов, увеличивает ее проницаемость для ионов натрия. Поток натрия внутрь клетки еще сильнее деполаризирует мембрану, тем самым делая ее все более проницаемой.

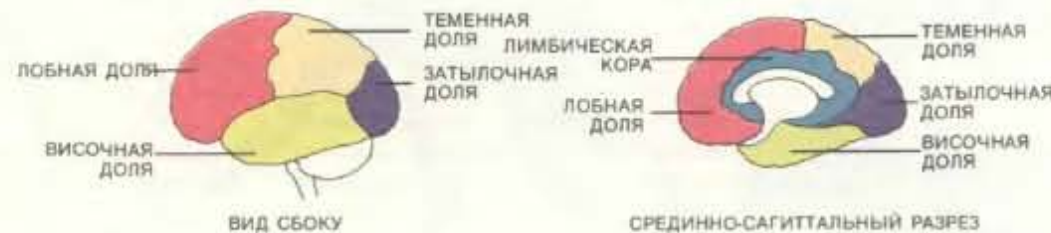
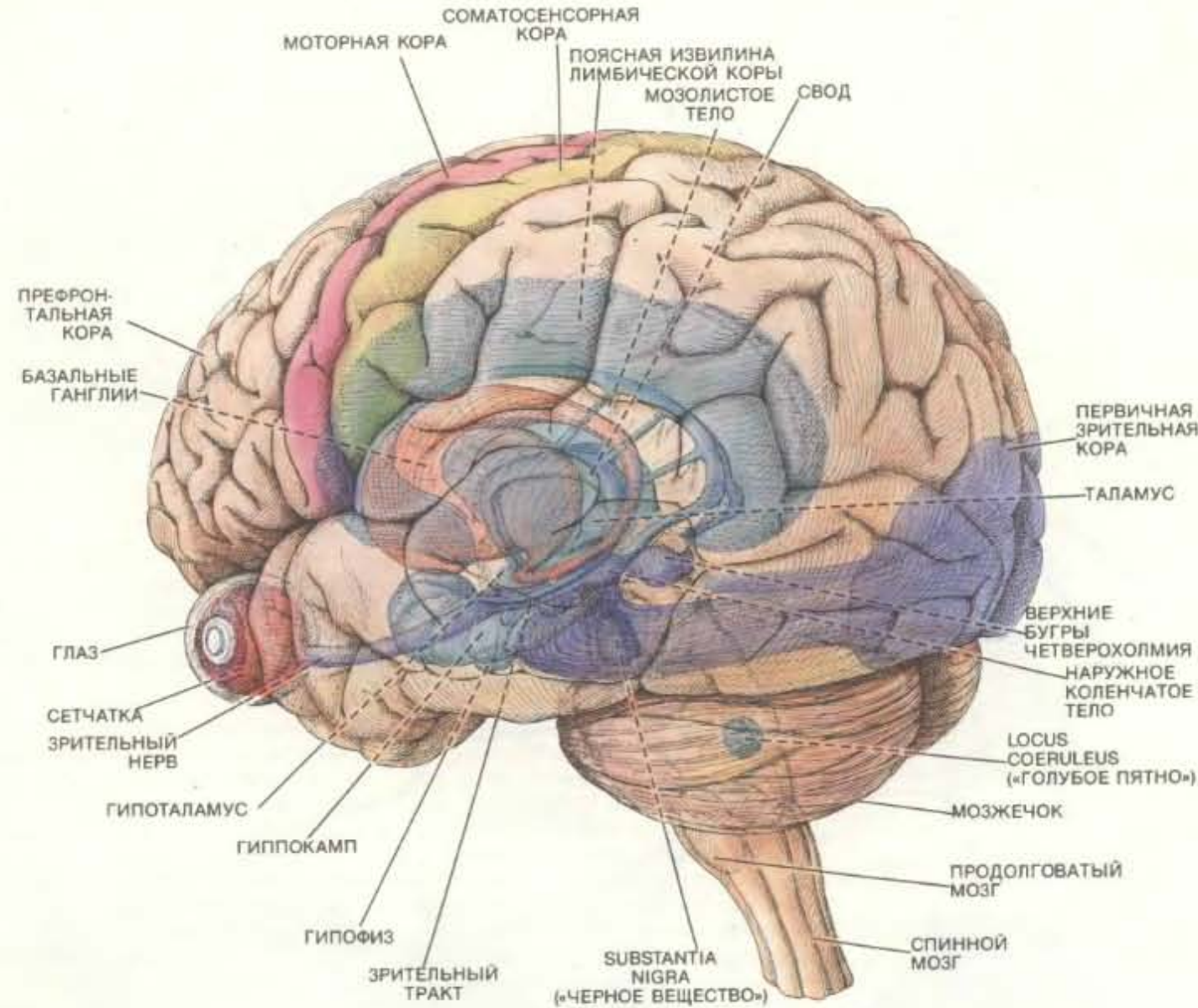
Когда достигается некое критическое значение потенциала, называемое пороговым, положительная обратная связь приводит к регенеративным сдвигам, в результате которых знак разности потенциалов изменяется на противоположный, т. е. внутреннее содержимое клетки становится заряженным положительно по отношению к внешней среде. Приблизительно через 1 мс проницаемость мембраны для натрия падает и трансмембранный потенциал возвращается к своему значению в состоянии покоя -70 мВ. После каждого такого «взрыва» нейрон остается на несколько миллисекунд рефрактерным, т. е. натриевая проницаемость мембраны в этот период не может измениться. Это кладет предел частоте генерации потенциалов действия — не более 200 раз в секунду.

Хотя аксоны и похожи на изолированные провода, импульсы они проводят иначе. Их кабельные характе-

ристики неважные: сопротивление вдоль оси слишком велико, а мембранное сопротивление слишком мало. Положительный заряд, проникающий в аксон во время потенциала действия, рассеивается уже через 1—2 мм. Чтобы преодолевать расстояния, составляющие иногда многие сантиметры, потенциал действия на пути своего распространения должен часто регенерироваться. Необходимость повторно усиливать ток ограничивает максимальную скорость распространения нервного импульса до приблизительно 100 м/с. Это более чем в миллион раз меньше той скорости, с которой электрический сигнал бежит по медной проволоке. Таким образом, потенциалы действия представляют собой сравнительно низкочастотные стереотипные сигналы, движущиеся по аксону с «черепашной» скоростью. Мимолетные мысли, по-видимому, зависят от временных соотношений между импульсами, следующими параллельно по многим аксонам, и от образуемых каждым из них связей, которых могут быть тысячи.

Мозг не синхритий, во всяком случае не простой синхритий. Потенциалы действия не могут перескакивать с одной клетки на другую. Чаще всего связи между нейронами опосредуются химическими передатчиками — специфическими веществами, называемыми нейромедиаторами (от англ. mediator — посредник), — выделяющимися из окончаний отростков нейронов в области специализированных межклеточных контактов, называемых синапсами. Когда потенциал действия достигает аксонной терминали (окончания аксона), молекулы медиатора выходят из внутриклеточных маленьких пузырьков, где они хранятся, в синаптическую щель — пространство шириной 20 нм между мембранами пресинаптической и постсинаптической клеток. Когда потенциал действия достигает пика, в нервную терминаль поступают ионы кальция. Движение этих ионов вызывает синхронный экзоцитоз — координированное выделение молекул нейромедиатора.

Высвободившиеся молекулы нейромедиатора связываются с рецепторами в постсинаптической мембране, что изменяет ее проницаемость. Эффект будет возбуждающим, если изменение заряда приближает мембранный потенциал к порогу генерирования потенциала действия. Если же мембрана стабилизируется на уровне потенциала покоя, эффект будет тормозным. Каждый синапс дает лишь незначительный эффект. Чтобы установилась интенсивность выхода (ча-

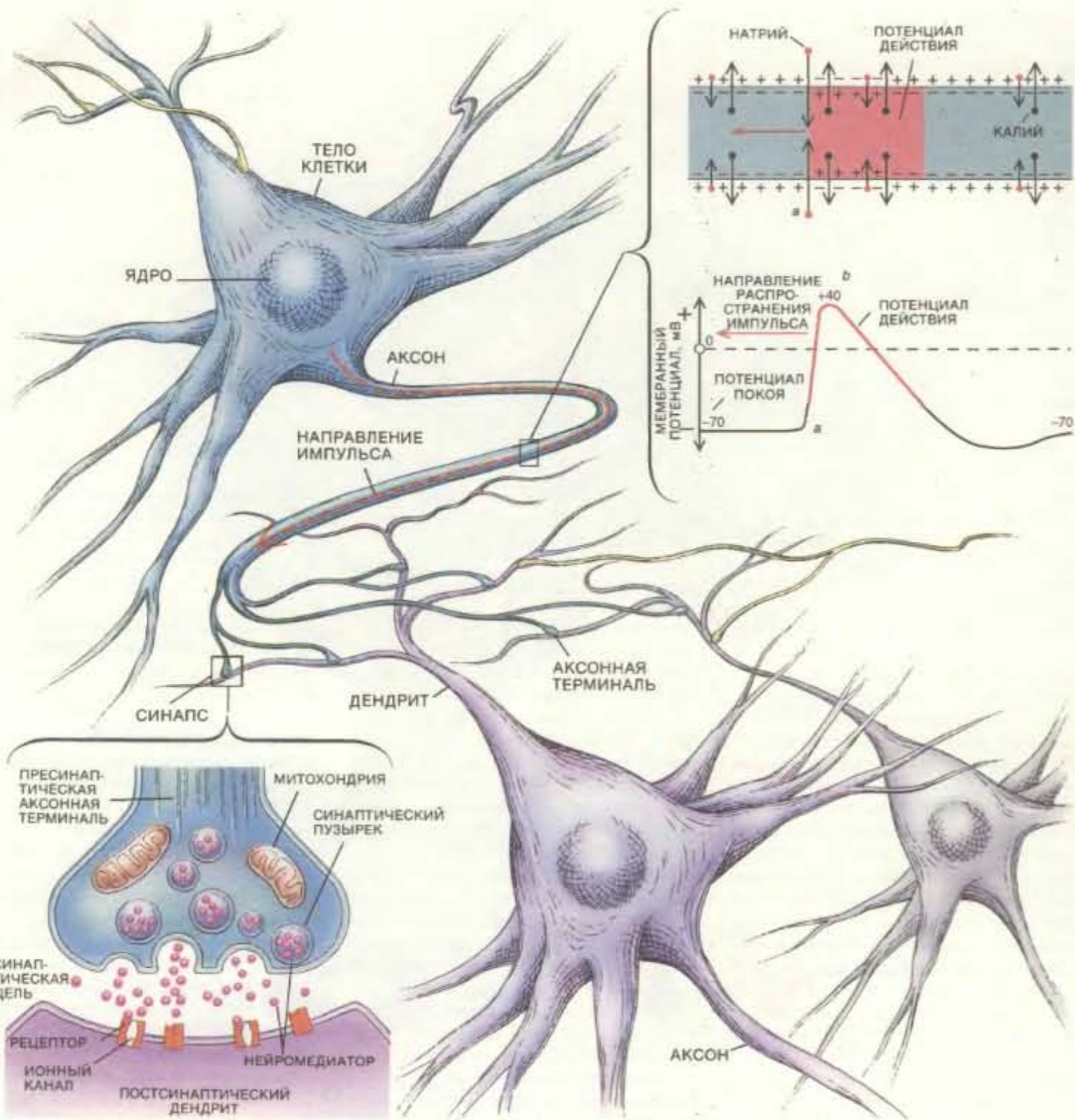


Головной мозг — орган психики

Человеческий мозг вполне справедливо называют иногда самым сложным объектом во Вселенной. Он содержит триллион клеток, из которых 100 млрд. представлены соединенными в сети нейронами — это субстрат интеллекта, творческих способностей, эмоций, сознания и памяти. Большие анатомические подразделения мозга соответствуют грубой карте его функциональных способностей. Головной мозг состоит из двух симметричных полушарий, связанных так называемым мозолистым телом и другими мостиками из нервных волокон. В его основании лежат такие структуры, как продолговатый мозг, регулирующий вегетативные функции (в том числе дыхание, кровообращение и пищеварение), и мозжечок, координирующий движения. В глубине головного мозга располагается лимбическая система (голубая) — совокупность структур, участвующих в эмоциональном поведении, долговременной па-

мяти и других функциях.

Сильно складчатая поверхность мозговых полушарий — кора — имеет толщину 2 мм и общую площадь около 1,5 м². Эволюционно наиболее древним отделом коры является часть лимбической системы. Более обширная и молодая новая кора разделена особенно глубокими бороздами (складками) на лобную, височные, теменные и затылочные доли. В процессе мышления и восприятия по коре распространяются нервные импульсы, называемые потенциалами действия. Некоторые области мозга со специализированными функциями изучены довольно обстоятельно, среди них — моторная (розовая), соматосенсорная (желтая) и зрительная (фиолетовая) кора. Совокупная активность всех отделов головного мозга порождает самый удивительный из всех нейробиологических феноменов — психику.



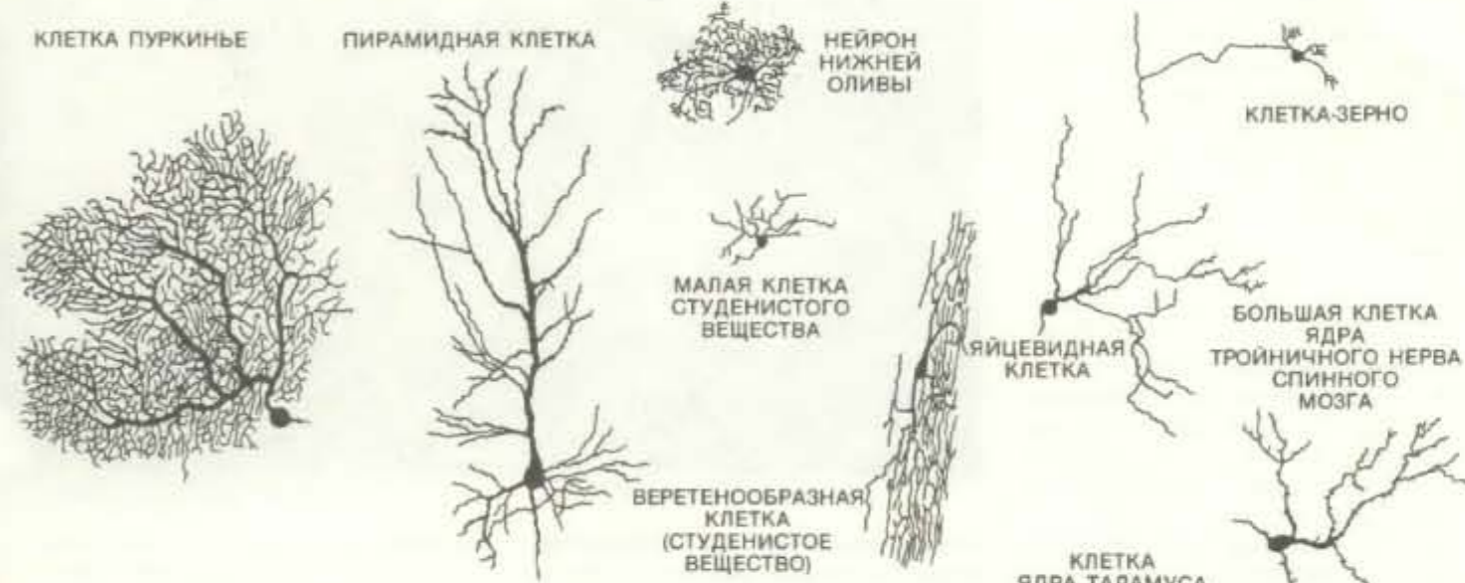
Коммуникация нейронов

Возбужденный нейрон (голубой) передает информацию другим нейронам (фиолетовые), генерируя импульсы, получившие название потенциалов действия. Эти сигналы распространяются, как волна, вдоль единственного аксона (длинного отростка) нервной клетки и превращаются в синапсах (участках контакта между нейронами) в химические сигналы.

Когда нейрон находится в состоянии покоя, на его мембране поддерживается разность электрических потенциалов на уровне приблизительно -70 мВ (внутренняя поверхность мембраны заряжена по отношению к внешней отрицательно). В покое мембрана лучше проницаема для ионов калия, чем натрия (это отражено длиной черных стрелок *справа вверх*). При стимуляции клетки проницаемость для натрия увеличивается и в клетку быстро проникают положительные заряды (*а*). В результате возни-

кает импульс — мгновенное изменение знака мембранного потенциала (*б*). Импульс инициируется там, где аксон отходит от тела нейрона, и распространяется по направлению от него (*красные стрелки*).

Когда импульс достигает терминалей (окончания) аксона пресинаптического нейрона, он вызывает выделение из них молекул нейромедиатора (*слева внизу*). Молекулы медиатора диффундируют через синаптическую щель — узкое пространство между пресинаптической и постсинаптической мембранами — и связываются с рецепторами в последней. Такое связывание ведет к открыванию ионных каналов и к генерированию потенциалов действия в постсинаптическом нейроне. (Для ясности некоторые элементы изображены в большем масштабе, чем другие.)



СТРУКТУРНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ НЕЙРОНОВ (здесь приведены их очертания в препаратах, окрашенных по Гольджи) помимо прочих факторов обеспечивает колоссальные способности мозга к хранению, поиску, использованию и выражению информации, а также к эмоциям и управлению движениями.

стога потенциалов действия), каждый нейрон должен непрерывно интегрировать до 1000 синаптических входов, которые при этом не просто линейно суммируются. Нейрон — это хитроумный компьютер.

В мозге идентифицировано множество разных типов медиаторов, и все они имеют огромное значение для его функционирования. С тех пор как в 1921 г. был идентифицирован первый нейромедиатор, список кандидатов на эту роль увеличивается со все возрастающей скоростью. Сегодня их число приблизилось к 50; многое уже известно о синтезе и выделении нейромедиаторов, об активации ими рецепторов в постсинаптической мембране.

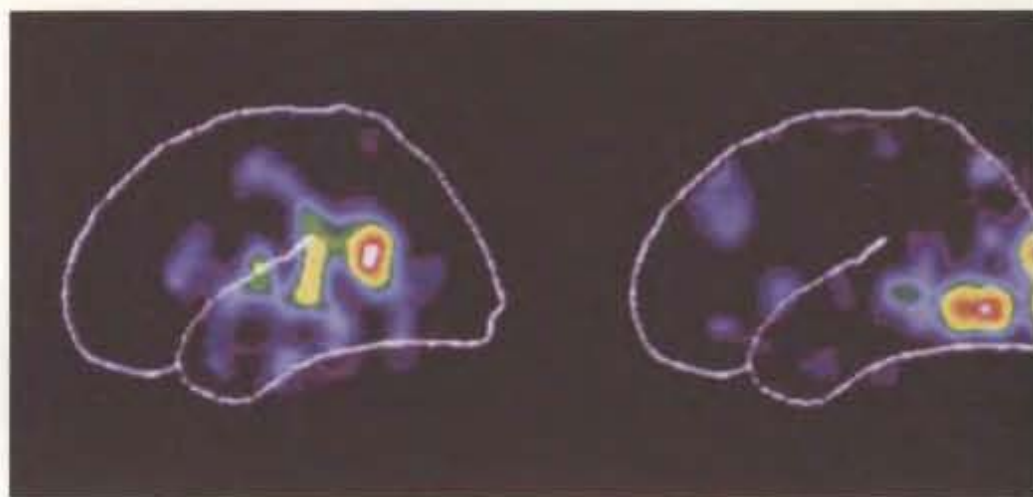
Такие исследования особенно пригодны для понимания психиатрических и неврологических болезней, что проливает свет на общие механизмы работы мозга (см. статью Э. Гершона и Р. Ридера «Важнейшие психические расстройства и мозг» на с. 83). Так, лекарственные препараты, снимающие тревогу (например, седуксен), усиливают действие важного тормозного нейромедиатора γ-аминомасляной кислоты. Антидепрессанты (например, прозак) усиливают действие серотонина, обладающего широким спектром функций. Коккаин способствует дофамину, а некоторые антипсихотические препараты выступают по отношению к этому медиатору антагонистами. Никотин активизирует рецепторы ацетилхолина, присутствующие повсюду в коре мозга. Более глубокое понимание химических основ мышления и поведения может быть достигнуто при наличии более

точных данных относительно участков действия всех этих мощных агентов и более избирательных лигандов — молекул, способных связываться с рецепторами.

Эффективность такого подхода «от молекулы — к разуму» можно иллюстрировать недавними достижениями в фармакологическом лечении шизофрении — самом обычном и самом злокозненном изо всех душевных заболеваний. К классическим антипсихотическим лекарствам относятся фенотиазины (например, торазин) и бутирофеноны (например, халдол), которые ослабляют такие симптомы, как галлюцинации, бред, расстройство мышления и неадекватность эмоциональных реакций, характерные для шизофрении и особенно ярко проявляющиеся в периоды острого психоза. Однако эти препараты не столь эффективны в отношении других шизофренических явлений — аутизма и нежелания разговаривать, наблюдающихся между острыми периодами. Кроме того, все они вызывают некоторую аномальную двигательную активность, когда их принимают против острого приступа заболевания (отсюда их другое название — нейролептики; от греческого *leptos* — легкий). Длительное применение фенотиазинов и бутирофенонов нередко приводит к тягостному расстройству, называемому поздней дискинезией. Это состояние характеризуется произвольными и подчас непрерывными судорожными движениями, которые могут надолго оставаться у больного и после прекращения приема лекарства.

Почему агенты, влияющие на пси-

ИЗОБРАЖЕНИЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА человека, выполняющего ряд заданий, связанных с оперированием словами, получены с помощью метода позитронной эмиссионной томографии М. Рейчлом из Медицинской школы Университета Вашингтона. Интенсивность кровотока в различных отделах мозга варьирует в зависимости от характера умственной деятельности.



ВОСПРИЯТИЕ НА СЛУХ

ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ СЛОВ

хические функции, вызывают также и двигательные симптомы? Ответ на этот вопрос подсказывает тот факт, что традиционные антипсихотические препараты прелотвращают связывание дофамина с его рецепторами. А ведь нервные клетки, содержащие дофамин, тела которых сосредоточены глубоко в среднем мозге, в области, называемой вентральной покрышкой, посылают свои аксоны в обширные области префронтальной коры, а также в подкорковые структуры, включая базальные ганглии, которые участвуют в двигательном контроле. Префронтальная кора имеет для шизофрении особое значение, так как содержит нервные сети, активно действующие в процессах оперирования символизированной информацией и одной из форм кратковременной памяти, называемой оперативной (см. статью П. Гольдман-Ракич «Оперативная память и разум» на с. 63). Не исключено, что нейроны в этой области составляют центральный узел программ сортировки.

Препарат клозапин влияет на обе группы симптомов шизофрении, причем, что самое важное, не вызывает поздней дискинезии. Открытие новых представителей семейства дофаминовых рецепторов, возможно, позволит объяснить уникальную эффективность и избирательность этого антипсихотического средства.

БЕЛКИ, служащие рецепторами нейромедиаторов, можно разделить на два больших (и все расширяющихся) класса на основании их аминокислотных последовательностей и предположений о структуре, исходящих из того, что эти молекулы погружены в клеточную мембрану. Предложена и более детальная схема классификации рецепторов, учитывающая их молекулярную архитектуру, равно как и более традиционные критерии связывания лигандов и функционирования. К одному классу относятся белки ионных каналов, образующие в мембране содержащие воду «поры», по которым проходят ионы. Они обеспечивают те изменения проницаемости мембраны, о которых речь шла выше. Рецепторы другого

класса, куда входят дофаминовые рецепторы, ионных каналов не образуют. Они сопряжены, т. е. взаимодействуют и, вероятно, располагаются по соседству с мембранными G-белками, разрывающими богатую энергией фосфатную связь в молекуле гуанозинтрифосфата (GTP), что инициирует каскад биохимических процессов, ведущих к специфической клеточной реакции. Эффекты, опосредуемые G-белками, характеризуются медленным началом и большей продолжительностью, нежели реакции, инициируемые непосредственно рецепторами с каналами. Маловероятно, что они участвуют в быстрой, «из точки в точку», синаптической передаче в мозге. Скорее такие эффекты модулируют реакцию ионных каналов на стимуляцию, определяя коэффициент усиления системы, подобно тому как педали пианино модулируют действие клавиш.

Первый ген дофаминового рецептора был выделен четыре года назад. В основе этой работы лежало предположение, что данный белок должен походить на другие известные рецепторы, сопряженные с G-белками. Поиск по гомологии весьма эффективен, он быстро привел к идентификации еще четырех рецепторов дофамина. Особое внимание привлекает один из них, названный D_4 , который связывает дофамин и клозапин с необычайно высокой аффинностью. Что не менее важно, ген D_4 в базальных ганглиях, по-видимому, не экспрессируется; возможно, этим и объясняется отсутствие поздней дискинезии. Знание точной локализации рецептора D_4 в префронтальной коре могло бы пролить свет на происхождение галлюцинаций или по крайней мере указать на то звено нервных механизмов, которое выходит из строя при шизофрении.

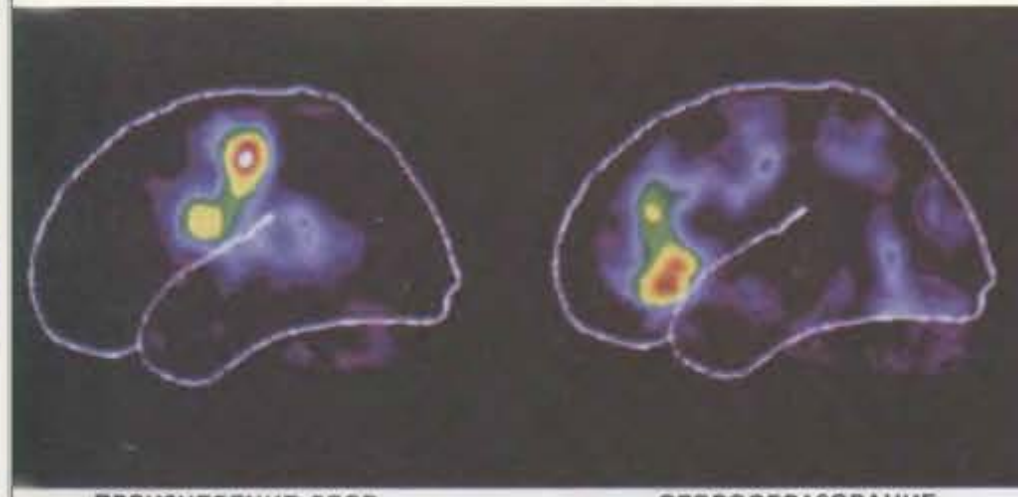
Озадачивает медлительность действия психоактивных препаратов. Взаимодействуют с рецепторами они

мгновенно, а симптомы шизофрении, депрессии и других расстройств не исчезают неделями. Нельзя судить об эффективности препарата только по ранним последствиям его рецепторного связывания. Отсюда возникает необходимость в более общем анализе механизмов влияния внешних факторов на мозг.

Изучение дофаминовых синапсов прояснило и природу наркомании. Одним из самых сильных и известных наркотиков является кокаин, который способен связываться с белком, удаляющим дофамин из места его действия, и ингибировать его. Проведенные недавно исследования указывают на нервный путь, который, возможно, служит мишенью всех наркотиков — амфетаминов, никотина, алкоголя и опиатов. Похоже, особенно важным звеном этого пути является небольшая часть базальных ганглиев, называемая nucleus accumbens. Дальнейшее изучение нейронов этой структуры наверняка углубит понимание поведения наркоманов, связанного с поиском наркотиков, а быть может, вскроет механизмы мотивации вообще.

Казалось бы, описанное структурное, функциональное и молекулярное разнообразие вполне может составить достаточную основу для психических функций. Но следует принять во внимание еще один аспект, а именно пластичность, т. е. способность синапсов и нейронных сетей изменяться в результате активности. Пластичность плетет тот узор нервных процессов, от которого зависят целостность и непрерывность психической жизни. Потенциалы действия не только кодируют информацию — их метаболические эффекты изменяют те нервные цепи, по которым они передаются.

Синаптическая пластичность лежит в основе информативно-коммуникационных нервных моделей, описываемых Дж. Хинтоном (см. его ста-



ПРОИЗНЕСЕНИЕ СЛОВ

СЛОВООБРАЗОВАНИЕ

тью «Как обучаются нейронные сети» на с. 103). Говоря более обобщенно, пластичность умножает сложность, обусловленную каким-либо жестким набором молекулярных признаков или клеточных функций. А следовательно, она обеспечивает еще более богатый субстрат для психических феноменов.

КАК ЯВСТВУЕТ из этого краткого экскурса в биологию синапса, возможно много разных способов изменения синаптической эффективности. Так, может быть усилено выделение нейромедиатора в результате некоторого увеличения поступления кальция в нервное окончание при потенциале действия. Может измениться вероятность активации постсинаптического рецептора. В большем масштабе времени активность синапса сказывается на числе функциональных рецепторов; по-видимому, изменением их количества, на что требуется какое-то время, объясняются отсроченные эффекты психотерапевтических агентов. Помимо влияния на функционирование синапсов нервная активность может изменять также их число и локализацию. Аксоны могут образовывать новые нервные окончания, когда «замолкают» их соседи, и непрерывно идет перестройка терминальных веточек дендритных деревьев (см. статью Д. Селко «Стареющий мозг» на с. 93).

Обсуждая пластичность и обучение, Э. Кзилел и Р. Хокнис (см. их статью «Биологические основы обучения и индивидуальности» на с. 43), рассматривают свидетельства в пользу гипотезы о том, что кратковременные синаптические изменения, связанные с простейшими формами обучения, сопровождаются молекулярной модификацией белков. Одной из форм этой модификации является фосфорилирование — присоединение фосфатной группы. Фосфорилирова-

ние сильно влияет на функционирование белка. Обычно оно стимулируется нейромедиаторами и препаратами, действующими через рецепторы, сопряженные с G-белками. Но белки через некоторое время (от нескольких минут до нескольких дней) разрушаются. Для долговременных форм памяти, следы которой нередко сохраняются на всю жизнь, требуются более стабильные сдвиги, связанные, к примеру, со стойкими изменениями генной экспрессии. Ключевым звеном здесь может оказаться обнаруженное недавно семейство генов, названных немедленными ранними генами (IEG), которые быстро активируются короткими всплесками потенциалов действия. Как и ожидалось от главных переключателей, инициирующих долговременные сдвиги, эти гены кодируют факторы транскрипции — белки, регулирующие экспрессию других генов.

Получены кое-какие указания на то, что импульсная активность усиливает экспрессию генов, кодирующих трофические факторы — белки, способствующие жизнедеятельности нейронов. Не исключено, что поговорка «Пользуйся — не то потеряешь!» в скором времени обретет конкретный биохимический смысл. Однако вопрос о том, как работает каждый из факторов транскрипции и каково их значение, остается пока открытым.

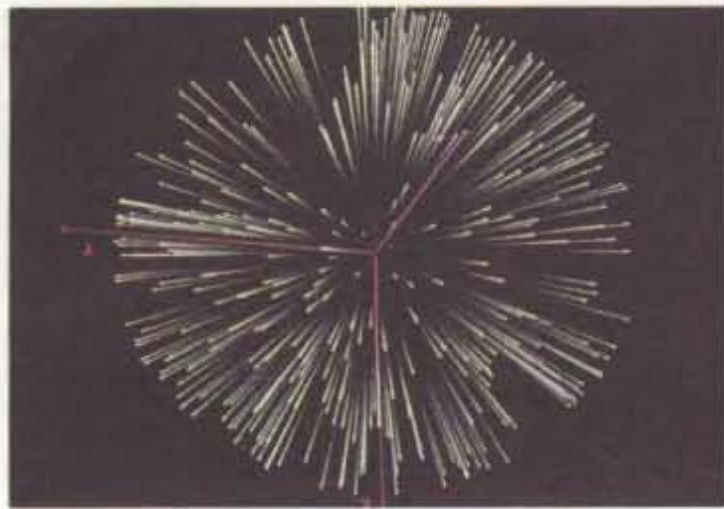
Пристальное внимание в исследованиях памяти уделяется также феномену так называемой долговременной потенциации, состоящей в стойком увеличении синаптической эффективности после коротких периодов стимуляции. Особенно обстоятельно изучаются синапсы гиппокампа, поскольку, как свидетельствуют клинические и экспериментальные данные, именно эта структура мозга участвует в тех формах памяти, для которых нужно сознание. В некоторых синапсах гиппокампа долговременная потенциация может держаться неделя-

ми. В этих синапсах она удовлетворяет выдвинутому Д. Хеббом критерию обучения, а именно требует совпадения пресинаптической и постсинаптической активности: если постсинаптический нейрон во время «пусковой» (пресинаптической) стимуляции остается неактивным, долговременной потенциации не происходит. Этот принцип был им сформулирован в 1949 г. в книге «Организация поведения» (Hebb D. The Organization of Behavior) в качестве условия, необходимого для образования новых нейронных ансамблей в процессе обучения. Его так часто повторяют, что он приобрел статус чуть ли не физиологического закона.

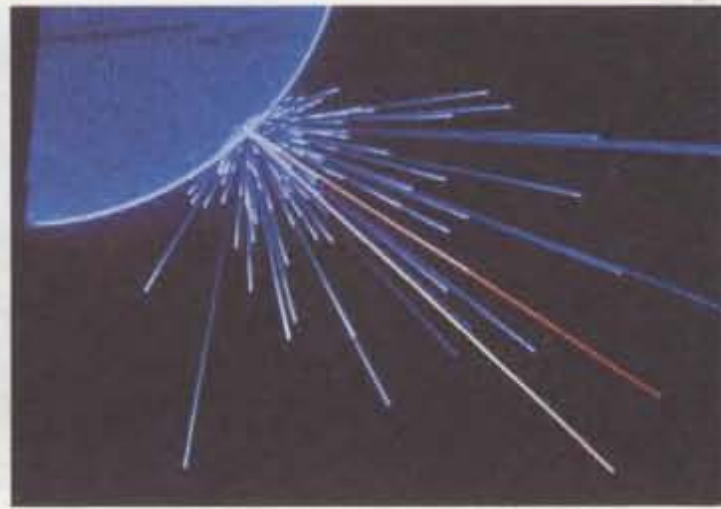
Синаптическую передачу в гиппокампе опосредует глутамат — наиболее распространенный в мозге возбуждающий нейромедиатор, а хеббовскую долговременную потенциацию блокирует аминокислота, являющаяся избирательным антагонистом одного из типов рецепторов глутамата. Она ухудшает способность к обучению с использованием пространственных ориентиров у крыс. Скорее всего здесь не просто совпадение, но еще не показано, что эти факты связаны причинно. Недавно клонирован ген, кодирующий рецептор глутамата, чувствительный к аминокислоте, являющейся избирательным антагонистом одного из типов рецепторов глутамата. Она ухудшает способность к обучению с использованием пространственных ориентиров у крыс. Скорее всего здесь не просто совпадение, но еще не показано, что эти факты связаны причинно. Недавно клонирован ген, кодирующий рецептор глутамата, чувствительный к аминокислоте, являющейся избирательным антагонистом одного из типов рецепторов глутамата. Она ухудшает способность к обучению с использованием пространственных ориентиров у крыс. Скорее всего здесь не просто совпадение, но еще не показано, что эти факты связаны причинно.

Хотя движущие силы пластичности зрелого мозга вездесущи и неослабны, необходимо подчеркнуть, что очень важны точность и прочность основной «монтажной схемы» нервной системы. В противном случае человек не мог бы ни воспринимать окружающее, ни координированно двигаться, не говоря уж о мышлении. При изучении высших функций мозга непременно должна учитываться точность межнейронных соединений.

ПРОВОДЯЩИЕ пути в головном мозге прослеживаются с помощью химических соединений, транспортируемых по аксонам. Такие метки можно визуализировать, если ткань соответствующим образом подготовлена и обработана. Связи между нейронами изучают также с помощью тонких микроэлектродов, которые располагают вблизи тела или аксона нервной клетки, чтобы уловить слабые токи, возникающие



НАМЕРЕНИЕ обезьяны двинуть рукой выявляется по электрической активности нейронов в моторной коре. Нервные импульсы регистрировали с помощью микроэлектродов. Каждая прямая отражает частоту разрядов отдельного нейрона. Компьютерное изображение слева показывает импульсную активность нейронов, связанную с движением руки в полной амплитуде. Справа изображе-



на импульсация нейронов, управляющих движением руки только в одном направлении (длинная желто-белая прямая). Направление вектора импульсации всей популяции нейронов в целом (красная прямая) почти совпадает с фактическим направлением движения руки. (Измерения выполнены А. Георгопулосом с сотрудниками из Университета Джонса Гопкинса.)

во время потенциалов действия. Все эти методы позволили выявить в мозговой коре упорядоченные топографические карты.

Поверхность человеческого тела представлена в постцентральной извилине коры, хотя корковые нейроны отделены от сенсорных рецепторов кожи тремя синапсами. Точно так же в первичной зрительной коре, находящейся в затылочной области мозга, представлена карта видимого мира, организованная по принципу «из точки в точку». Упорядоченность заметна в организации каждой из переключающихся структур на пути в мозговую кору; топографическая упорядоченность обнаруживается также в организации проекций из первичных зон коры в ее центры более высокого уровня.

Чтобы оценить точность, присущую монтажным схемам мозга, достаточно познакомиться с фундаментальным открытием, которое около 30 лет назад сделали Д. Хьюбел и Т. Визел. Они обнаружили, что нейроны в первичной зрительной коре (зоне V1) реагируют на ориентированные определенным образом линейные отрезки или края, но не отвечают на пятна света, активирующие входные нейроны в сетчатке и наружном колленчатом теле таламуса. Это означает, что нейроны зоны V1 через наружное колленчатое тело связаны с ганглиозными клетками сетчатки, расположенными вдоль линии предпочтительной ориентации.

Анатомия главных сенсорных и моторных систем мозга известна более или менее подробно. Напротив, картина связей внутри перемежающихся

с ними ассоциативных корковых зон и больших подкорковых ядер мозговых полушарий недостаточно ясна. Исследования П. Гольдман-Ракич направлены на расшифровку монтажной схемы префронтальной коры у обезьян с целью получить более полное представление о природе памяти. Вопиюще скудны наши знания об аналогичных связях в головном мозге человека. Если молекулярные строительные блоки и функции отдельных нейронов эволюционно консервативны, т. е. по существу одинаковы у разных видов, то о корковых связях этого предполагать нельзя. В конце концов, именно сложностью сети этих связей *Homo sapiens* и отличается от всех прочих форм жизни. Не исключено, что и здесь потребуются работы вроде знаменитого проекта «Геном человека», целью которого являются идентификация и картирование всего генетического материала человеческого организма.

Что происходит со специфичностью синаптических связей в ходе индивидуального развития? К. Шатц рассматривает механизмы, управляющие ростом аксонов к соответствующим мишеням, в зрительной и других системах (см. ее статью «Развивающийся мозг» на с. 23). Полагают, что начальные стадии роста аксона и выбор его пути не зависят от нейронной активности. Генетически детерминированная часть программы развития нервной системы проявляется в замечательной полноте ее монтажной схемы, которая формируется в эмбриональный период жизни. Но как только растущие кончики аксонов достигают надлежащей области, на выбор

мишени начинают влиять нервные импульсы, спонтанно генерируемые в мозге или же возникающие в ответ на события внешнего мира. Образование синапсов в критический период развития может зависеть от своего рода конкуренции между аксонами, среди которых преимущество имеют те, которые получают адекватную стимуляцию.

По крайней мере в некоторых областях мозга на формирование синапсов во время раннего развития влияют стероидные гормоны (см. статью Д. Кимура «Половые различия в организации мозга» на с. 73). Анатомические, физиологические и поведенческие данные указывают на то, что у мужчин и женщин головной мозг не одинаков.

ПАТТЕРН информационного потока в мозге в процессе умственной деятельности трудно определить только с помощью анатомического анализа монтажной схемы или изучения пластичности. Поиск нервных коррелятов высших психических функций ведется в исследованиях с использованием бодрствующих приматов, обученных выполнять задания, где требуются способность к суждению, планированию либо запоминанию или же все эти качества одновременно. Для этого подхода нужны хитроумное оборудование, сложные эксперименты и месяцы тренировок, пока обезьяна не научится ходу мыслей, предлагаемому ей исследователем. Проводить ночи напролет за прослушиванием во время опыта усиленных потенциалов действия одного или нескольких нейронов и дни за анализом

полученных данных — вот обычный образ жизни ученого, занимающегося такими проблемами. Дело движется медленно, но уже сделаны кое-какие важные обобщения.

Один из ключевых принципов деятельности мозга состоит в иерархической организации сенсорных систем. Иными словами, по мере увеличения расстояния (т. е. числа синапсов) между источником сложных раздражителей и нейронами последние реагируют на все более абстрактные свойства этих раздражителей. Например, нейроны зоны V1 реагируют на линии, а не на световые пятна. Другой важный принцип, обстоятельно рассмотренный С. Зеки, заключается в том, что информация об объекте внешнего мира передается в мозге не по какому-то одному пути, а разные характеристики одного перцепта (объекта восприятия) перерабатываются в параллельных системах (см. статью С. Зеки «Зрительный образ в сознании и в мозге» на с. 33). Так, у человека, играющего в теннис, сигналы о движении, цвете и форме мячика перерабатываются в разных корковых зрительных центрах. Разделение этих информационных потоков начинается уже в сетчатке; изолированными они остаются и на пути к высшим зрительным центрам — в наружном колленчатом теле и первичной зрительной коре.

Аналогичная картина наблюдается в слуховой системе. М. Кониши и его сотрудники из Калифорнийского технологического института показали, что у слухи определение местонахождения источника звука зависит от различий в восприятии его фазовых и амплитудных характеристик разными ушами. Разница в фазах указывает на локализацию источника звука по азимуту, а в амплитудах — на высоту его расположения над землей. Фазовые и амплитудные сигналы перерабатываются в мозге в разных системах, минуя три синаптических переключения. Похоже, что этот принцип параллельной переработки информации присущ и другим сенсорным системам, ассоциативным зонам коры и моторным путям мозга.

ГДЕ информационные потоки сходятся вновь? Когда теннисист осознает приближение мячика? Рецептивные поля нейронов высших центров обширнее, чем нейронов низших «станций» переключения, поэтому они охватывают большую долю внешнего мира. Зеки описывает модель, основанную на обратных связях от клеток с большими рецептивными полями к клеткам первичной зрительной коры, обладающим высокой про-

странственной разрешающей способностью. Такие нейронные сети с обратной связью, возможно, координируют активность клеток с высокой пространственной разрешающей способностью, расположенных в первичной коре, и клеток, реагирующих на более абстрактные свойства раздражителей независимо от их локализации. По мнению Ф. Крика и К. Коха, важная роль в зрительном сознании принадлежит регистрируемому повсюду в коре колебаниям импульсной активности с частотой 40 Гц (см. их статью «Проблема сознания» на с. 113). Эти колебания, обнаруженные В. Зингером с коллегами из Института мозга им. Макса Планка во Франкфурте, могут синхронизировать импульсацию нейронов, реагирующих на различные компоненты воспринимаемого эпизода, и, таким образом, представлять собой прямой нервный коррелят сознания.

Кониши идентифицировал в мозге слухи нейроны, реагирующие на то или иное сочетание различий в восприятии фазовых и амплитудных характеристик звука разными ушами, но не на различия в восприятии какого-либо одного из этих параметров в отдельности. Эти нейроны, расположенные в глубине мозга, в структуре, называемой нижними буграми четверохолмия, активируют двигательную программу, в результате которой птичка поворачивает голову по направлению к источнику звука.

Пожалуй, самый высокий уровень абстракции на сегодня обнаружен у относящихся к зрительной системе нейронов «лица», которые у обезьян расположены в нижней височной борозде. Эти нейроны реагируют на лица и не отвечают ни на какие другие зрительные раздражители. Подобные клетки могут присутствовать и в головном мозге человека. Разрушение соответствующей области височной доли приводит к весьма избирательному нарушению, называемому прозопагнозией, при которой теряется способность узнавать лица. В слуховой системе зербовой амандины высокий уровень абстракции характеризует нейроны, присутствующие в мозге у каждого самца и реагирующие только на сложную песню его отца, но не на простые свисты или песни других самцов того же вида.

Сколько нейронов должны изменить частоту импульсации, чтобы возник сигнал связанного образа перцепта (гештальт)? Самое крайнее мнение состоит в том, что здесь все может сделать одна клетка. По одному специфическому нейрону на каждое лицо? Это предположение маловероятно хотя бы потому, что еже-

дневно мозг человека теряет тысячи нейронов и подобная расточительность была бы неразумной. Большого внимания заслуживает точка зрения, сложившаяся в результате проведенных недавно экспериментов, в которых было показано, что нейроны «лица» характеризуются широкой настройкой, реагируя не на одно лицо, а на лица с похожими чертами. Сколько нейронов должно активироваться, чтобы произошло узнавание лица, неизвестно, но имеющиеся данные указывают скорее на участие в этом процессе немногочисленных клеток, чем на какую-то глобальную или диффузную активацию.

У нейронов «лица» есть аналоги в моторной системе. У некоторых беспозвоночных идентифицированы командные нейроны, которые по принципу «все или ничего» управляют комплексами фиксированных действий (например, стереотипной реакцией избегания). А. Георгопулос из Университета Джонса Гопкинса нашел такие командные нейроны, кодирующие направление движения руки, в моторной коре (в прецентральной извилине) у обезьян. Импульсация этих клеток не связана с сокращением какой-либо определенной мышцы или же с силой координированного движения. Как и нейроны «лица» в височной доле, каждый командный нейрон моторной коры обладает весьма широким спектром настройки.

Вектор, получающийся в результате суммирования частоты импульсации многих нейронов, коррелирует с направлением движения лучше, чем активность какого-либо отдельного нейрона (см. рисунок на с. 18). Такой вектор формируется за несколько миллисекунд перед сокращением соответствующих мышц, и рука приходит в движение. Все это должно рассматриваться как признак планирования движения. Вектор обычно является результатом активности менее чем 100 нейронов; в моторной коре, как и в височной борозде, преобладает, по видимому, кодирование немногочисленными нейронами.

Следующий важный шаг на этом уровне анализа — попытка вызывать психические феномены фокальной электрической стимуляцией мозга. Начало здесь было положено У. Ньюсамом с сотрудниками из Станфордского университета. Они обучали обезьян решать, в каком направлении двинутся пятна, высвечивающиеся на экране в случайных положениях. Когда число пятен, двинувшихся на экране в определенном направлении, достигало некоторого критического «порога», необходимому обезьянам для безошибочного суждения о на-

правлении движения всей совокупности пятен в целом, фокальная стимуляция зоны V5 мозговой коры влияла на перцептивные оценки животных.

Инсульт и прочие трагические «эксперименты природы» также проливают свет на нервные корреляты психических феноменов. Давнюю традицию изучения нарушений речи у неврологических больных продолжают Антониу и Анна Дамазу (см. их статью «Мозг и речь» на с. 55). Такие исследования требуют тщательного анализа психики с помощью целого набора тестов, позволяющих выявлять самые тонкие расстройства. Поясним на примере необходимость в определениях психических феноменов. Дамазу предположили, что речь можно рассматривать как трехкомпонентную систему: образование слов, представление понятий и промежуточные процессы, играющие роль посредников между первыми двумя компонентами. Если, как они считают, речь эволюционировала как инструмент для «сжатия» понятий и эффективной коммуникации с их помощью, то четкие представления о ее функциональной анатомии позволят понять и суть психики.

Против слишком опрощенного признания принципа кодирования многочисленными нейронами или даже локализации функций в качестве универсальных механизмов деятельности мозга предостерегает еще один «эксперимент природы» — феномен фантомных конечностей, т. е. весьма живого ощущения руки или ноги на месте утраченной в результате травмы или хирургического вмешательства. Такие фантомы могут восприниматься человеком как неотъемлемая часть его тела или собственного «я» (см. статью: Мелзак Р. Фантомные конечности, «В мире науки», № 6, 1992). Мучительным компонентом этого синдрома являются сильные боли. Определить локализацию возникновения таких ощущений невозможно. Делались попытки избавить больных от фантомных болей путем перерезки периферических нервов, разрушения восходящих нервных путей и удаления чувствительных структур головного мозга. Все эти способы ликвидировать боль успеха не имели. Возможно, что та эмоциональная реакция, которую мы называем болью, включает в себя активацию нейронов в широко разбросанных по всему мозгу участках.

Будущее когнитивной нейробиологии зависит от возможностей изучения живого человеческого мозга. Многие в этом плане обещают позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и получение изображений с

помощью магнитного резонанса (МР). Эти неинвазивные методы изображения мозга основаны на тесной связи между нейронной активностью, потреблением энергии и местным кровотоком. На такую связь еще в 1890 г. указывал Ч. Шеррингтон, а позднее она получила количественное обоснование в работах С. Кетти и Л. Соколофа из Национального института психического здоровья. Мозг никогда не бывает в состоянии полного покоя. Изменения же местного кровотока, выявляемые с помощью ПЭТ и МР, невелики (20—50%). Поэтому в подобных измерениях существенны сложные алгоритмы, позволяющие отличить характер кровотока во время выполнения человеком умственного задания от контрольного состояния относительного покоя. Выявляемые сдвиги в кровотоке ставятся в соответствие с теми или иными мозговыми структурами на основании аккуратного наложения компьютерных изображений на точную анатомическую карту мозга.

Ни один из этих методов, однако, не обладает сегодня достаточной пространственной разрешающей способностью, чтобы дать изображение отдельной колонки мозговой коры. Кроме того, малая временная разрешающая способность обоих методов требует многократного выполнения умственного задания испытуемым в течение сеанса регистрации. Наверняка в скором времени и ПЭТ, и в особенности быстрое МР-сканирование будут технически усовершенствованы. Однако как бы ни были в настоящее время ограничены возможности экспериментирования с людьми, способными задумываться по команде, его преимущества очевидны.

ИТАК, во всех областях исследования психики в самом скором времени можно ожидать все больших и больших успехов. Скоро будет точно известно, сколько имеется в мозге медиаторов и их рецепторов и где сосредоточены те или иные их типы. Составится более полная картина эффектов нейромедиаторов, включая мно-

жественные взаимодействия одновременно выделяемых модуляторов. Выяснятся подробности о веществах, влияющих на дифференцировку и дегенерацию нейронов. Молекулы психики не уникальны. Многие нейромедиаторы — это обычные аминокислоты, встречающиеся во всех частях тела. Точно так же не обнаружилось никаких новых, специфических для мозга принципов или химических соединений при изучении гормональной регуляции и трофических факторов, влияющих на жизнеспособность и дифференцировку нейронов. Главная задача теперь — узнать, каким образом эти вещества модулируют монтажную схему мозга и как эта функциональная нервная сеть порождает психические феномены.

Наконец, важно конкретно определить содержание утверждения: «Психические события скоррелированы с электрическими сигналами». Несомненно, на этом уровне анализа назрела настоятельная необходимость в теории. Как подчеркивают Крик и Кох, речь идет об одной из самых животрепещущих проблем когнитивной нейробиологии.

Является ли психика новым, обретенным самостоятельностью свойством электрической и метаболической активности мозга? Новое свойство — это такое свойство объекта, которое нельзя объяснить свойствами составляющих его компонентов, если рассматривать их по отдельности. Так, сердце бьется, потому что работа его водителя ритма зависит от разнонаправленных потоков определенных ионов. Но сердечный автоматизм не понять без учета величины и кинетики всех ионных токов в совокупности. А при наличии этих данных что же остается объяснять физиологическими терминами? Точно так же, как только проявятся отдельные компоненты нервных функций, очевидными могут стать и объяснения психических событий. И в наше распоряжение в результате поступит более адекватный словарь для описания явления с новыми свойствами — психики.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

Заглянуть внутрь тела

ДАВНЯЯ мечта о возможности видеть сквозь непрозрачные предметы, часто используемая в комиксах и научно-фантастической литературе, приблизилась на один шаг к реальности. Или, точнее, к виртуальной реальности. Генри Фуш, профессор ки-

бернетике Университета Северной Каролины в Чепел-Хилл и два студента-старшекурсника Майк Бахура и Рютарау Обучи подошли вплотную к технологии создания моделируемой окружающей среды при управлении от компьютера для разработки того, что будет предшествовать созданию «рентгеновских очков» для врачей.

Пока же видение осуществляется не с помощью рентгеновского излучения, а посредством ультразвука. Для наложения ультразвукового изображения плода на «живое» видеоизображение брюшной полости беременной женщины исследователи применили реальное средство, уже доступное в рамках виртуальной реальности, — экран, одеваемый в специальном приспособлении на голову оператора. Изображение на жидкокристаллическом экране приспособления, напоминающего нашлемный дисплей, отражает все то, что видел бы обычный наблюдатель. Ультразвуковое изображение, наложенное на видеоизображение брюшной полости, как бы открывает «окно» внутрь тела.

С помощью такой системы врач смог бы получить точную пространственную перспективу положения зонда внутри тела. Например, сейчас, чтобы выполнить пункцию плодного пузыря, врач должен производить весьма трудную корреляцию между сонограммой на экране установленного у кровати видеомонитора и фактическим положением иглы по мере ее введения в полость матки и продвижения в водную оболочку. Аналогично врач, выполняющий пункционную биопсию, мог бы с большей точностью направлять иглу, глядя в ультразвуковой «иллюминатор».

Этот метод отличается от более ранних форм виртуальной реальности, в которых наблюдатель видит фантастический мир трехмерных графических изображений, создаваемых компьютером.

В своей работе Фуш и его студенты сделали шаг вперед в области виртуальной реальности, добавив в нее изображения реального мира. На первом испытании, проведенном с добровольным участием женщины на 38-й неделе беременности, исследователь с надеждой на голову дисплеем наблюдал на экране тело женщины, в то время как его ассистент водил ультразвуковым сканирующим датчиком по ее животу для получения двумерных изображений плода. Ультразвуковые изображения просцировались на видеозэкран в соответствующей пространственной ориентации. Возможности координации изображений достигалась благодаря магнитному сенсору, установленному на потолке и следившему за положением головы исследователя и ультразвукового сканирующего датчика. Различные изображения комбинировались в соответствии с точными пространственными координатами в одно целое посредством специального графического компьютера.



«СКРЫТЫЙ МИР» становится видимым благодаря применению головного экрана (слева), который позволит врачам заглядывать в брюшную полость будущей матери посредством слияния ультразвукового и видеоизображений (справа).

Более совершенный вариант такой системы мог бы стать ценным инструментом для врача. Однако исследователи из Северной Каролины должны вначале сконцентрировать внимание на трудностях при «слиянии» различных видов «живых» изображений. Одна из проблем, связанных с более ранней системой, заключалась в том, что ультразвуковая картинка оказывалась неестественно «прилипленной» к верхней части брюшной полости. Фуш со своими студентами, чтобы преодолеть это, «создал» в полости тела испытуемого «виртуальную дыру». Благодаря этому сонограмма может теперь располагаться внутри разреза, построенного с помощью трехмерной графики.

Наблюдатель видит комбинированное «видеоультразвуковое» изображение участка тела испытуемого только левым глазом (правый жидкокристаллический экран пустой). Изображение можно сделать более реалистичным, если разместить на головном экране вторую камеру и получить совместно с первой стереоскопическое изображение. От двумерного сканирующего датчика, кроме того, поступает ультразвуковое изображение (в настоящее время в других академических организациях, таких, как Университет Дьюка, ведется работа по созданию трехмерного ультразвукового датчика). То, что видит наблюдатель на ультразвуковой картинке, представляет собой узкую полосу серого изображения на черном фоне. «Это все равно, что смотреть сквозь замочную скважину», — говорит Фуш.

Другими моментами, требующими к себе внимания, являются повыше-

ние разрешающей способности головного экрана и усовершенствование следящей системы сенсора с тем, чтобы она могла «угадывать» направление поворота головы наблюдателя и обеспечить таким образом плавное перемещение ультразвукового изображения вместе с видеозображением.

Более быстрое получение улучшенного изображения будет достигаться также благодаря постоянному повышению и так уже «молниеносной» скорости работы специального графического компьютера, применяемого для создания изображения. Университет Северной Каролины уже стал обладателем одного из наиболее мощных в мире компьютеров, предназначенных для представления графических изображений в масштабе реального времени. Он называется «Pixel-Planes 5» и является параллельным компьютером, содержащим более 320 тыс. однобитовых процессоров.

Экраны «сквозного видения» могут также оказаться весьма полезными и вне медицины. Составное изображение, полученное на основе видеокamеры и радара миллиметрового диапазона, дало бы возможность просматривать горящее здание сквозь пелену дыма для отыскания оставшихся в нем людей. Графические элементы, наложенные на изображение фюзеляжа самолета, могли бы указать техническому обслуживающему персоналу точное расположение гидравлических магистралей или электропроводки. Таким образом, виртуальную реальность можно будет использовать как дополнение к реальным изображениям.

Гэри Стук



Развивающийся мозг

Основы разума закладываются в эмбриональный период развития мозга, когда формируются упорядоченные связи между миллиардами нейронов. В этом процессе решающую роль играют как активность самих нервных клеток, так и внешние факторы

КАРЛА ДЖ. ШАТЦ

МОЗГ взрослого человека содержит более 100 млрд. нейронов. Эти клетки столь сложно и специфично связаны друг с другом, что возможны такие аспекты разума, как память, зрение, обучение, мышление, сознание и многие другие. Одной из наиболее замечательных особенностей взрослой нервной системы является точность межнейронных связей. Похоже, ничто в этой сложнейшей системе не остается на волю случая. Достижение такой сложности представляется тем более удивительным, если принять во внимание, что в течение первых нескольких недель развития организма из оплодотворенной яйцеклетки большинство органов чувств даже не связаны с соответствующими мозговыми центрами переработки информации. А ведь именно в эмбриональный период должны образоваться нужные количества нейронов в должных местах, а их аксоны — выбрать правильные пути к своим мишеням и в итоге сформировать необходимые связи.

Как же формируются такие точные межнейронные взаимосвязи? Одна из гипотез состоит в том, что формирование мозга идет по мере развития плода аналогично сборке компьютера, где кристаллы и другие компоненты собираются и связываются воедино согласно предсуществующей схеме. В соответствии с этой аналогией в определенный момент эмбрионального развития некий биологический выключатель приводит компьютер в действие. Данное представление должно подразумевать, что вся структура мозга записана в своего рода чертежах — предположительно ДНК — и он начинает функционировать только после по существу полного установления межнейронных связей.

Работа, проделанная за последнее десятилетие, показывает, что биология развития мозга подчиняется совсем другим правилам. Межнейронные связи со временем совершенствуются, и их картина у взрослого организма лишь в общих чертах соответствует исходной незрелой. И хотя человек рождается с почти полным набором мозговых нейронов, мозг новорожденного по массе составляет только около четверти взрослого органа. Мозг растет за счет увеличения размеров нейронов и числа их отростков — аксонов и дендритов, что сопровождается возрастанием степени их взаимосвязи.

Исследователи, изучающие развитие мозга, обнаружи-



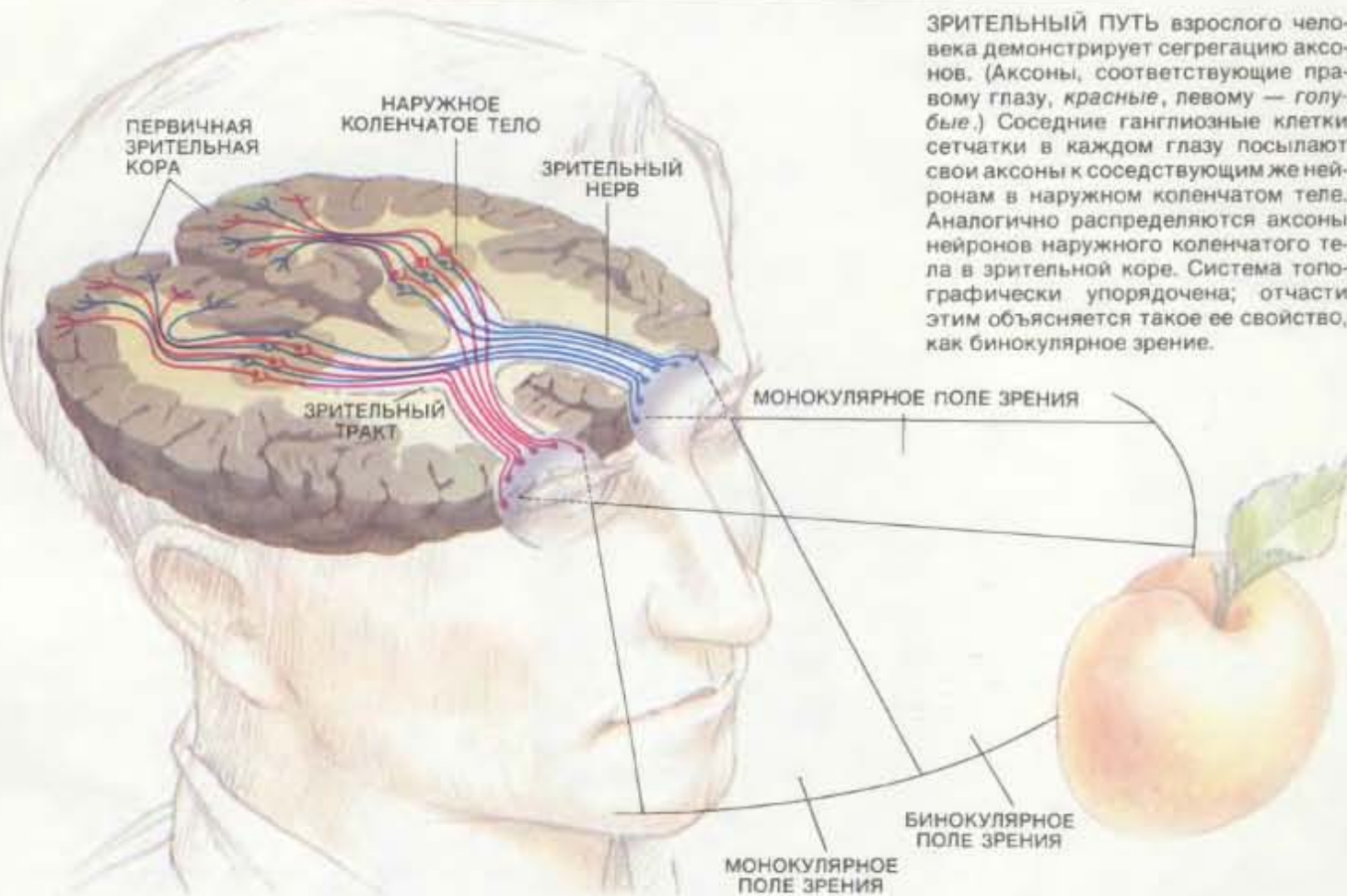
ли, что для достижения свойственной взрослому точности его организации необходима определенная нервная активность, т. е. мозг должен определенным образом стимулироваться. В самом деле, за прошедшие несколько десятилетий накопились наблюдения, свидетельствующие о том, что дети, проводившие большую часть первого года жизни, лежа в колыбели, развиваются ненормально медленно. Некоторые из них не способны сидеть вплоть до 21-го месяца жизни, менее 15% начинают

ходить к 3-м годам. Для полноценного развития ребенок должен получать стимуляцию из внешней среды — зрительную, слуховую (в том числе речевую), осязательную. Основываясь отчасти на таких наблюдениях, родители порой стремятся всемерно обогатить окружение детей в надежде стимулировать их развитие. Однако новейшие исследования в этой области не дают ясных свидетельств эффективности такой «сверхстимуляции».

Нужно еще много исследований, чтобы убедительно определить, какие сенсорные сигналы способствуют формированию специфических межнейронных связей у новорожденных. В качестве первого шага на пути к пониманию этого явления нейробиологи сфокусировали свое внимание на развитии зрительной системы у животных в первое время после рождения, когда относительно легко контролировать приобретенный зрительный опыт и наблюдать поведенческий ответ на малейшие изменения. Кроме того, глаз мало различается у разных видов млекопитающих. Зрительная система является плодотворным объектом для изучения еще и по той физиологической причине, что ее нервные клетки в сущности такие же, как в других частях мозга, а значит, результаты исследований, весьма вероятно, приложимы и ко всей нервной системе человека.

НО, НАВЕРНОЕ, наиболее важным для исследователя преимуществом зрительной системы является возможность четко поставить в соответствие структуру и функцию, а также проследить путь от внешнего стимула до физиологического ответа. Ответ зрительной системы на воздействие со стороны окружающей среды начинается с того, что рецепторные клетки глаза — палочки и колбочки сетчатки — трансформируют световой сигнал в нервный. Эти клетки посылают сигналы к интернейронам, а те — к выходным нейронам сетчатки, называемым ганглиозными клетками. Аксоны ганглиозных клеток (составляющие зрительный нерв) соединяют их с переключающей структурой мозга, известной под названием наружного коленчатого тела. Нейроны наружного коленчатого тела в свою очередь посылают зрительную информацию определенным нейронам 4-го слоя шестислойной первичной зрительной коры. Эта корковая область располагается

СЕМИНЕДЕЛЬНЫЙ ПЛОД ЧЕЛОВЕКА имеет длину около 2,5 см. Видны глаза и конечности, различим и формирующийся мозг. Для его полноценного развития необходима нервная стимуляция. Большинство нейронных систем продолжают развиваться в неонатальный период жизни.



ЗРИТЕЛЬНЫЙ ПУТЬ взрослого человека демонстрирует сегрегацию аксонов. (Аксоны, соответствующие правому глазу, красные, левому — голубые.) Соседние ганглиозные клетки сетчатки в каждом глазу посылают свои аксоны к соседствующим же нейронам в наружном колленчатом теле. Аналогично распределяются аксоны нейронов наружного колленчатого тела в зрительной коре. Система топографически упорядочена; отчасти этим объясняется такое ее свойство, как бинокулярное зрение.

в затылочной доле каждого из полушарий мозга (см. рисунок сверху).

Внутри наружного колленчатого тела аксоны ганглиозных клеток левого и правого глаза строго разделены: идущие от разных глаз аксоны, чередуясь, образуют глазоспецифичные слои, каждый из которых относится лишь к одному либо к другому глазу. Терминалы нейронов наружного колленчатого тела в свою очередь распределены локальными пятнами: эти аксоны оканчиваются в определен-

ных, ограниченных участках 4-го слоя зрительной коры, каждый из которых отвечает «своему» глазу. Участки, соответствующие разным глазам, вместе образуют структуры, названные колонками глазодоминантности.

Чтобы в процессе развития установилась такая система связей, аксоны

должны расти на значительные расстояния, поскольку их мишени формируются в различных областях мозга. Так, ганглиозные клетки сетчатки образуются в самом глазу; нейроны наружного колленчатого тела — в эмбриональной структуре, называемой промежуточным мозгом и дающей

впоследствии таламус и гипоталамус; клетки 4-го слоя зрительной коры возникают в другом протооргане — конечном мозге, который затем развивается в кору головного мозга. Еще в начале развития плода эти три структуры находятся друг от друга на расстоянии многих клеточных диаметров. И все же, как только ту или иную мишень становится возможным идентифицировать, аксоны достигают ее и располагаются совершенно точно и топографически правильно, т. е. так, что окончания аксонов клеток, соседствующих в одной структуре, оказываются на соответствующих соседних же клетках участка-мишени.

Этот процесс развития можно сравнить с проводкой телефонной линии между определенными домами, расположенными в определенных городах. Например, чтобы проложить провода между Бостоном и Нью-Йорком, надо обойти Провиденс, Хартфорд, Нью-Хейвен и Стамфорд. Достигнув же Нью-Йорка, линия должна быть направлена в нужный район (мишень) и далее, согласно адресу, по определенной улице к данному абоненту (топографическое расположение). Как показали К. Гудман из Калифорнийского университета в Беркли и Т. Джессел из Колумбийского университета, в большинстве случаев аксоны сразу выбирают правильное направление и растут вдоль него, находя нужную мишень с высокой точностью. Предполагается, что своего рода «молекулярное чувство» ведет растущие аксоны к цели. Действительно, аксоны обладают специали-

зированными структурами — конусами роста, способными распознавать соответствующие направления благодаря тому, что они как бы чувствуют ряд специфических веществ, присутствующих на поверхности клеток вдоль пути роста аксона либо просто выделяемых ими в межклеточное пространство. Сами мишени тоже могут выделять молекулярные метки. Удаление таких меток (генетически или хирургически) приводит к бесцельному росту аксонов. Когда аксоны достигают своих мишеней, перед ними возникает проблема правильного выбора адресата. В отличие от поиска направления следования и обнаружения участка-мишени распознавание адресата происходит не сразу, а включает в себя процесс корректировки многих первоначально ошибочных связей.

ПЕРВОЕ указание на то, что аксоны выбирают своих адресатов не сразу точно, дали эксперименты с использованием радиоактивно меченых веществ, позволяющих проследить межклеточные связи. Введение таких агентов последовательно на все более поздних стадиях развития плода выявляет ход становления и характер аксонных проекций. Эти исследования показали также, что различные структуры мозга возникают не одновременно, чем еще более усложняется процесс выбора адресата.

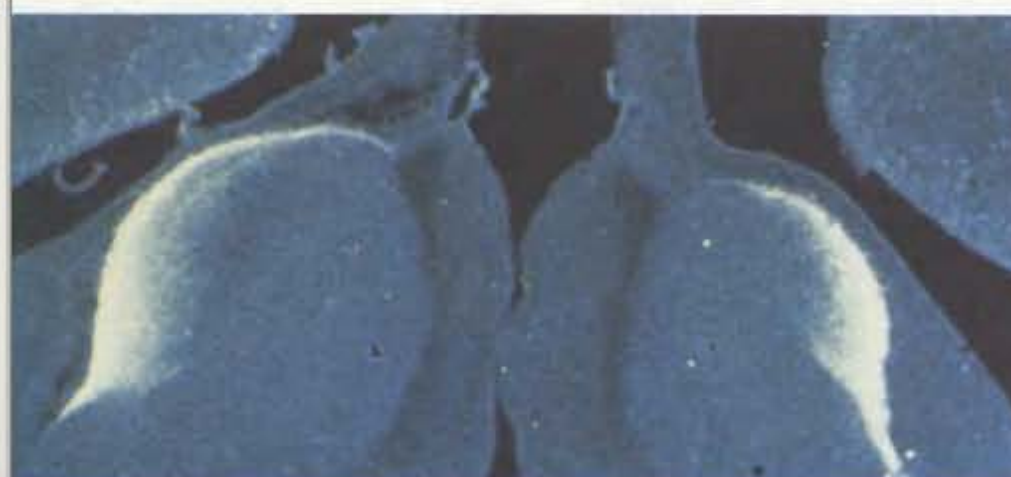
Например, П. Ракнич из Йельского университета показал, что у обезьян в зрительном тракте сначала устанавливаются связи между сетчаткой и на-

ружным колленчатым телом, а затем уже — между этим последним и 4-м слоем зрительной коры. По данным других работ, у кошек и приматов (включая человека) слои наружного колленчатого тела формируются до рождения — раньше, чем появляются палочки и колбочки сетчатки (а значит, прежде возникновения самой возможности зрения). С. Ле Вей, М. Страйкер и я, работая после защиты докторской диссертации в Медицинской школе Гарвардского университета, обнаружили, что у кошек к моменту рождения еще нет колонок в 4-м слое зрительной коры (см. иллюстрацию внизу). Как я выяснила впоследствии, на предшествующих стадиях развития у плода отсутствует слоистое построение наружного колленчатого тела. Эти важнейшие особенности зрительных структур возникают только постепенно и на разных стадиях развития.

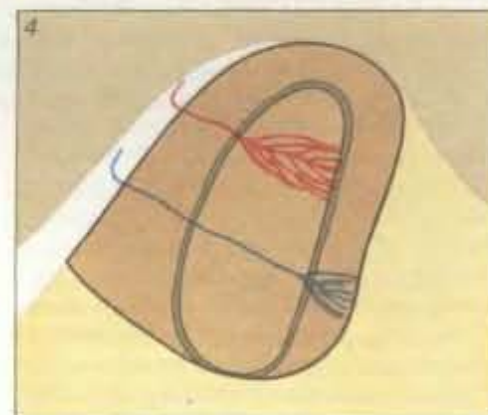
Аналогично структурной организации межклеточных связей функциональные свойства нейронов достигают присущей им специфичности лишь через некоторое время после рождения. Так, микроэлектродное отведение от зрительной коры у новорожденных котят и обезьян выявило, что большинство нейронов 4-го слоя одинаково отвечает на стимуляцию любого из глаз. А у взрослых животных каждый из этих нейронов отвечает преимущественно или исключительно на стимуляцию только какого-то одного глаза — либо левого, либо правого. Следовательно, в процессе окончательного выбора своего адресата аксоны должны исправлять допущенные ими ранее ошибки — ликвидировать входы от «не того» глаза.

В 1983 г. мой коллега П. Кирквуд и я получили дополнительные свидетельства в пользу того, что по мере развития должна происходить тонкая настройка образованных аксонами связей. В этой работе использовались 6-недельные кошачьи эмбрионы (беременность у кошек длится около 9 недель). Мы выделяли значительную часть зрительного тракта — от ганглиозных клеток обоих глаз до наружного колленчатого тела — и помещали такой препарат в специальную камеру, где клетки сохранялись живыми в течение суток. (К этому подходу пришлось прибегнуть потому, что применение микроэлектродной техники к целому эмбриону очень затруднительно.) Затем зрительные нервы подвергались электрическому раздражению, чтобы вызвать в аксонах ганглиозных клеток потенциалы действия — другими словами, нервные сигналы. В результате было обнаружено, что на данной стадии раз-

РАЗВИТИЕ НЕЙРОНОВ зрительной системы у кошки выявлено здесь с помощью радиоактивно меченых веществ, введенных в эндолимфу левого глаза. Изображения соответствуют виду сверху. Метка (белые участки) обнаруживается только в областях, иннервируемых от этого глаза. В наружном колленчатом теле (слева сверху) большинство аксонов от левого глаза оканчивается в слоях правого ядра, хотя некоторое количество метки видно и в левом. Сходное распределение наблюдается в колонках глазодоминантности 4-го слоя зрительной коры (слева внизу); темные промежутки соответствуют областям, иннервируемым от другого глаза. Характер распределения аксонов у взрослого организма иной, чем у незрелого (справа), где зоны иннервации еще не обособлены и метка размещается равномерно.



вития нейроны наружного колленчатого тела, во-первых, отвечают на раздражение ганглиозных клеток, а во-вторых, получают входы от обоих глаз. У взрослых же нейроны каждого слоя в этой структуре отвечают на стимуляцию только соответствующего глаза.



АКСОННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА в наружном колленчатом теле происходит задолго до рождения. На начальном этапе развития (1) аксоны от обоих глаз просты по форме и заканчиваются конусами роста. (Зона перекрытия самым темным тоном.) В ходе развития аксоны приобретают множество боковых ответвлений (2), а затем теряют некоторые из них, но образуют терминальные разветвления (3), которые в итоге занимают определенную территорию, формируя глазоспецифичный слой (4).

ВОЗНИКНОВЕНИЕ в итоге дискретно функционирующих доменов (таких, как колонки глазодоминантности или слои) говорит о том, что аксоны действительно корректируют собственные связи в ходе выбора адресата. Сам же процесс такого выбора зависит от характера ветвления индивидуальных аксонов.

В 1986 г. Д. Сретаван, будучи аспирантом в моей лаборатории, изучил некоторые детали этого процесса. В опытах на кошачьих эмбрионах он на последовательных стадиях развития избирательно метил целлюлозными ганглиозными клетками сетчатки — от клеточного тела до окончаний их аксонов в наружном колленчатом теле. Обнаружилось, что на относительно ранней стадии, когда аксоны ганглиозных клеток только что выросли в наружное колленчатое тело (примерно на 6-й неделе беременности), их форма весьма проста: палочковидный отросток с конусом роста на конце. Несколько днями позже аксоны от обоих глаз приобретают своего рода «волосатость»: по всей их длине появляются короткие боковые отростки.

Присутствием таких боковых ответвлений в этот период развития и объясняется феномен перемешивания входов от разных глаз на нейронах наружного колленчатого тела. Другими словами, в данный момент в системе еще не установились характерные для взрослого организма структуры, где каждый глаз имеет свою ограниченную область представления. По мере развития аксоны ганглиозных клеток теряют боковые ответвления, но начинают ветвиться в области окончаний. Вскоре аксоны, идущие от каждого глаза, приобретают широко разветвленные терминалы, локализованные в пределах только соответствующего слоя. Там же, где аксоны от одного глаза пересекают слои, иннервируемый от другого глаза, они гладкие, без боковых ответвлений (см. рисунок слева).

Последовательность изменений в характере ветвления аксонов показывает, что свойственная взрослому организму картина межнейронных связей складывается в результате аксонных перестроек, суть которых в избирательных процессах ликвидации и отрастания различных ветвей. По-видимому, поначалу внутри области мишени аксоны растут по многим адресам, а затем каким-то образом устраняются возникшие ошибки.

Аксонные перестройки можно объяснить тем, что на поверхности клеток-мишеней появляются специфические молекулярные метки. Правда, при всей концептуальной привлекательности эта гипотеза имеет очень мало экспериментальных подтверж-

дений. Альтернативное объяснение представляется более убедительным. Оно предполагает, что иннервация всех нейронов области-мишени равновероятна, а формирование специфичных функциональных зон происходит путем своеобразного соревнования, конкуренции между входными аксонами.

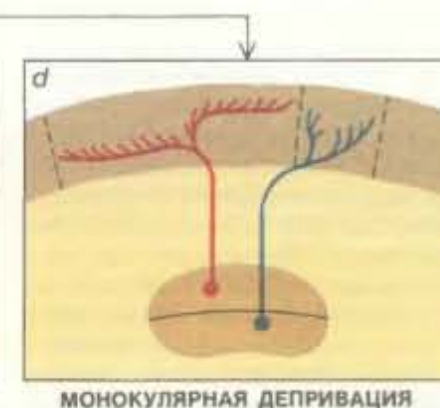
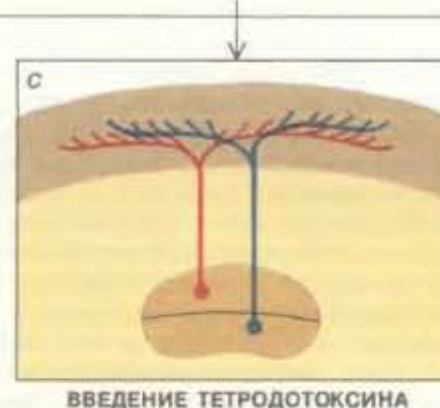
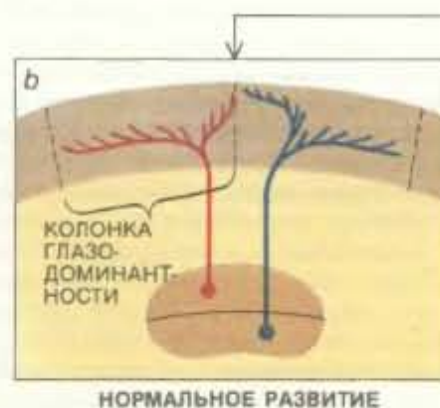
Важным ключом к пониманию природы конкурентных взаимоотношений между аксонами за клетки-мишени являются результаты экспериментов Д. Хьюбела из Медицинской школы Гарвардского университета и Т. Визела из Рокфеллеровского университета. В 1970-е годы они, работая в Гарварде, изучали развитие катаракты у детей. Клинические наблюдения свидетельствовали, что если вовремя не вмешаться в ход болезни, то она может привести к необратимой слепоте. Пытаясь создать усиленную модель этого феномена, Хьюбел и Визел шинвали веки у новорожденных котят. И оказалось, что даже недельное лишение зрительной стимуляции в таком раннем возрасте может повлиять на формирование колонок глазодоминантности. Аксоны от наружного колленчатого тела, представляющие закрытый глаз, по сравнению с нормой занимают меньшие области иннервации в 4-м слое зрительной коры. Напротив, аксоны, соответствующие открытому глазу, занимают области, большие, чем в норме.

Притом эти эффекты ограничены неким критическим периодом. Для взрослых людей катаракта, которая по достижении определенной стадии обычно удаляется хирургически, не опасна постоянной слепотой. Очевидно, у взрослого организма критический период давно позади и связи в мозге не могут быть изменены. Такие наблюдения свидетельствуют о том, что колонки глазодоминантности формируются вследствие их использования. Аксоны наружного колленчатого тела, представляющие разные глаза, каким-то образом конкурируют друг с другом за общую территорию в 4-м слое зрительной коры. При равноценном использовании колонки, соответствующие левому и правому глазу, получают одинаковыми, а неравное пользование приводит к неэквивалентному распределению территории в 4-м слое.

КАКИМ образом пользование теми или иными аксонами отражается в прочных анатомических связях? В зрительной системе «использование» означает генерирование потенциалов действия всякий раз при преобразовании зрительного сигнала в нервный и последующую его передачу

Развитие и нервная функция

Одна из характерных особенностей развития зрительной системы состоит в сегрегации входных влияний, поступающих от разных глаз: каждый глаз приобретает свою область представительства в зрительной коре. Этот процесс успешно завершается лишь в условиях стимуляции нейронов. Так, установлено, что у новорожденных котят области 4-го слоя зрительной коры, иннервируемые аксонами разных глаз, частично перекрываются (а). Зрительная стимуляция приводит к разделению зон иннервации соответ-



ствующих аксонов и формированию колонок глазодоминантности (b). Этот нормальный ход развития может быть блокирован тетродотоксином; в результате сегрегации аксонов не происходит и колонки глазодоминантности не образуются (c). Нарушить развитие можно также путем депривации, т. е. если закрыть один глаз, тем самым лишив его зрительной стимуляции. В этом случае аксоны, соответствующие открытому глазу, занимают в зрительной коре большую территорию, чем им следовало бы.

по аксонам ганглиозных клеток в мозг. Возможно, эффект закрытого глаза в развитии колонок глазодоминантности объясняется тем, что от него меньше поступает потенциалов действия. Если это действительно так, то блокада всех потенциалов действия в течение критического периода постнатального развития должна препятствовать установлению аксонами необходимых связей и приводить к ненормальному развитию зрительной коры. Страйкер и У. Харрис, работая в Гарварде после получения докторской степени, получили именно такой результат, блокируя потенциалы действия в ганглиозных клетках сетчатки с помощью тетродотоксина: в этих условиях колонки глазодоминантности не формировались (слои же в наружном колленчатом теле не затрагивались, так как они образуются раньше, в период внутриутробного развития).

Тем не менее сами по себе потенциалы действия недостаточны для структурной компартиментализации коры. Нервная активность не может быть случайной. Напротив, она имеет строго определенный характер как во времени, так и в пространственном отношении и, кроме того, реализуется при наличии соответствующих

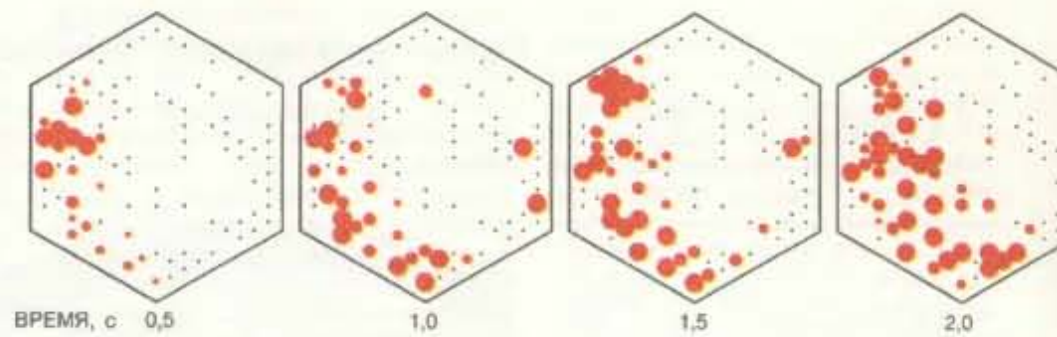
синапсов. Страйкер и Ш. Стрикланд в Калифорнийском университете в Сан-Франциско показали, что искусственное одновременное раздражение всех аксонов зрительных нервов может препятствовать подразделению аксонов нейронов наружного колленчатого тела по зонам иннервации в 4-м слое зрительной коры.

Хотя эти наблюдения напоминают результаты экспериментов с тетродотоксином, между ними есть весьма важное отличие. В данном случае ганглиозные клетки генерируют потенциалы действия, но все одновременно. Сегрегация же при формировании колонок в зрительной коре происходит только при асинхронном раздражении нервов от левого и правого глаза. В этом смысле совместное возбуждение нервных клеток приводит к тому, что и связи они устанавливаются вместе. Временная последовательность в возбуждении нейронов является критическим фактором, определяя, какие синаптические связи укрепятся и сохранятся, а какие ослабнут и элиминированы. В естественных условиях корреляция активности соседних ганглиозных клеток происходит сама собой благодаря тому, что они получают раздражение от одних и тех же частей видимой картины.

Каков синаптический механизм укрепления или ослабления межнейронных связей? Еще в 1949 г. Д. Хебб из Университета Макгилла выдвинул предположение о существовании особых синапсов, выполняющих эту роль. В таком синапсе при совпадении возбуждения в пресинаптической (передающей сигнал) и постсинаптической (принимающей сигнал) клетках эффективность передачи сигнала повышается. Ясные свидетельства существования синапсов Хебба дали изучение феномена долговременной потенциации в гиппокампе. Для этой области мозга установлено, что совпадение пре- и постсинаптической активности может приводить к все возрастающему повышению эффективности синаптической передачи между данными двумя нейронами. Эта усиленность синапса может сохраняться от нескольких часов до нескольких дней.

Синапсы Хебба предположительно играют важную роль в памяти и обучении (см. статью Э. Кэндела и Р. Хоккина «Биологические основы обучения и индивидуальности» на с. 43). Работы В. Зингера из Института мозга им. Макса Планка во Франкфурте и И. Френьяка с коллегами из Парижского университета говорят о нали-

АКТИВНОСТЬ СЕТЧАТКИ, зарегистрированная гексагонально расположенными микроэлектродами (черные точки) с интервалом 0,5 с, характеризуется локальной синхронизацией. Каждый шестиугольник изображает картину и интенсивность импульсной активности (красный цвет) индивидуальных ганглиозных клеток в данный момент времени. Волна возбуждения распространяется по сетчатке здесь из нижнего левого в правый верхний угол.



чии синапсов Хебба также в зрительной коре в критический период, хотя их свойства недостаточно ясны.

До сих пор не известно, каким конкретно образом совпадение нейронной активности вызывает длительные изменения в синаптической передаче. Среди специалистов бытует мнение, что постсинаптическая клетка должна как-то распознавать совпадение в активности иннервирующих ее аксонов и посылать в ответ некий сигнал ко всем синхронно импульсирующим окончаниям — пресинаптическим входам. Но это не дает полного объяснения. В самом деле, в процессе развития колонок глазодоминантности синаптические окончания, возбуждающиеся асинхронно, снижают эффективность передачи и элиминируются. Следовательно, надо предположить, что существует механизм ослабления синаптической передачи в зависимости от степени активности.

Это ослабление — род долговременной депрессии (длительного угнетения) — должно происходить, когда пресинаптические потенциалы действия не сопровождаются возбуждением постсинаптического нейрона. Синапсы с такими свойствами (противоположность синапсам Хебба) обнаружены в гиппокампе и мозжечке. Судя по результатам экспериментов Стрикленда и Страйкера, весьма вероятно присутствие подобных синапсов и в зрительной коре.

Сходные процессы аксонных перестроек происходят в спинномозговых мотонейронах в ходе становления иннервации их мишеней — мышц. У взрослых млекопитающих каждое мышечное волокно иннервируется только одним мотонейроном. Но вначале, когда аксоны мотонейронов

достигают мышц и устанавливаются первые контакты с ними, каждое мышечное волокно иннервируется многими мотонейронами. Впоследствии, как и в зрительной системе, часть синаптических входов элиминируется, и в итоге складывается картина иннервации, свойственная взрослому организму. Исследования нервно-мышечной передачи показали, что для осуществления процесса элиминации необходима определенная временная последовательность импульсной активности мотонейронов.

Потребность в специфической пространственно-временной организации активности в нервной системе может быть уподоблена задаче проверки правильности связей в телефонной сети посредством телефонных звонков из одного города (наружное коленчатое тело) в другой (зрительная кора). Когда два соседа в наружном коленчатом теле одновременно

звонят соседним абонентам в коре, одновременно звонящие телефоны в соседних домах 4-го слоя удостоверят, что отношения соседства при установлении телефонной связи сохранены. Если же один из соседей в наружном коленчатом теле ошибочно соединен со значительно отстоящим участком в 4-м слое зрительной коры или с участком, получающим иннервацию от другого глаза, то тамошний телефон редко когда будет звонить одновременно с соседними. Это и приведет к ослаблению, а затем и полной ликвидации ошибочной связи.

В УПОМИНАВШИХСЯ до сих пор исследованиях изучались перестройки межнейронных связей уже после приобретения животными способности двигаться или видеть. А что происходит до этого, на более ранних стадиях развития? Действуют ли механизмы аксонных перестроек прежде, чем мозг может отвечать на стимулы внешнего мира? Мы с коллегами сочли, что формирование слоев в наружном коленчатом теле у кошек является прекрасным объектом для изучения данного вопроса. Ведь в ходе развития есть период, когда палочки и колбочки просто еще не существуют и, следовательно, невозможна генерация потенциалов действия под действием зрительных стимулов. Могут ли в таких условиях формироваться специфические для каждого глаза территории?

Мы здесь рассуждали следующим образом. Если на ранних стадиях развития для этого нужна импульсная активность, то она как-то должна генерироваться, скажем, самими ганглиозными клетками. Импульсация ганглиозных клеток сетчатки могла бы способствовать формированию слоев, поскольку к рассматриваемому моменту развития все необходимые для конкуренции синаптические механизмы уже имеются. Тогда появление глазоспецифичных слоев должно предотвращаться путем блокирования импульсной активности на участке между глазом и наружным коленчатым телом.

низм сортировки нервных окончаний, основанный на взаимной корреляции их импульсной активности. Необходимо также, чтобы соседние ганглиозные клетки в каждом глазу возбуждались почти одновременно, а импульсация клеток разных глаз была асинхронной. Далее, синапсы между аксонами ганглиозных клеток и нейронами наружного коленчатого тела должны быть типа синапсов Хебба, т. е. обладать способностью «чувствовать» корреляции в активности иннервирующих окончаний и повышать эффективность передачи.

С целью такого блокирования Страйкером имплантировали беременным кошкам внутриматочно специальный мини-насос, содержащий тетродотоксин, непосредственно перед нормальным сроком формирования слоистой структуры наружного коленчатого тела (примерно 6-я неделя внутриутробного развития). Через две недели после этой операции оценивался ее эффект в отношении формирования слоев. К большому нашему удивлению, полученные результаты явно свидетельствовали о том, что в присутствии тетродотоксина глазоспецифичные слои не формируются. Кроме того, характер ветвления аксонов ганглиозных клеток становился весьма необычным. В отличие от интактных животных того же возраста у обработанных тетродотоксином эмбрионов аксоны не обладали строго ограниченной терминальной зоной ветвления, а напротив, имели многочисленные ветви по всей своей длине. Такое могло получиться, если в отсутствие импульсной активности не было и необходимой для аксонных перестроек информации.

В 1988 г. примерно одновременно с завершением этих экспериментов Л. Галли-Реста и Л. Маффеи из Пизанского университета, достигнув высочайшего технического мастерства, провели непосредственную регистрацию активности ганглиозных клеток у находящегося в утробе плода. Они впрямую продемонстрировали способность эмбриональных ганглиозных клеток к генерации пачечной активности в темноте. Эти результаты в совокупности с нашими убедительно свидетельствовали о наличии у плода импульсной активности ганглиозных клеток и о ее необходимости для разделения аксонов от разных глаз и формирования глазоспецифичных слоев в наружном коленчатом теле.

Однако должно еще существовать некое организующее начало для установления пространственно-временного хода активности ганглиозных клеток. При случайной импульсации клеток не может действовать меха-

низм сортировки нервных окончаний, основанный на взаимной корреляции их импульсной активности. Необходимо также, чтобы соседние ганглиозные клетки в каждом глазу возбуждались почти одновременно, а импульсация клеток разных глаз была асинхронной. Далее, синапсы между аксонами ганглиозных клеток и нейронами наружного коленчатого тела должны быть типа синапсов Хебба, т. е. обладать способностью «чувствовать» корреляции в активности иннервирующих окончаний и повышать эффективность передачи.

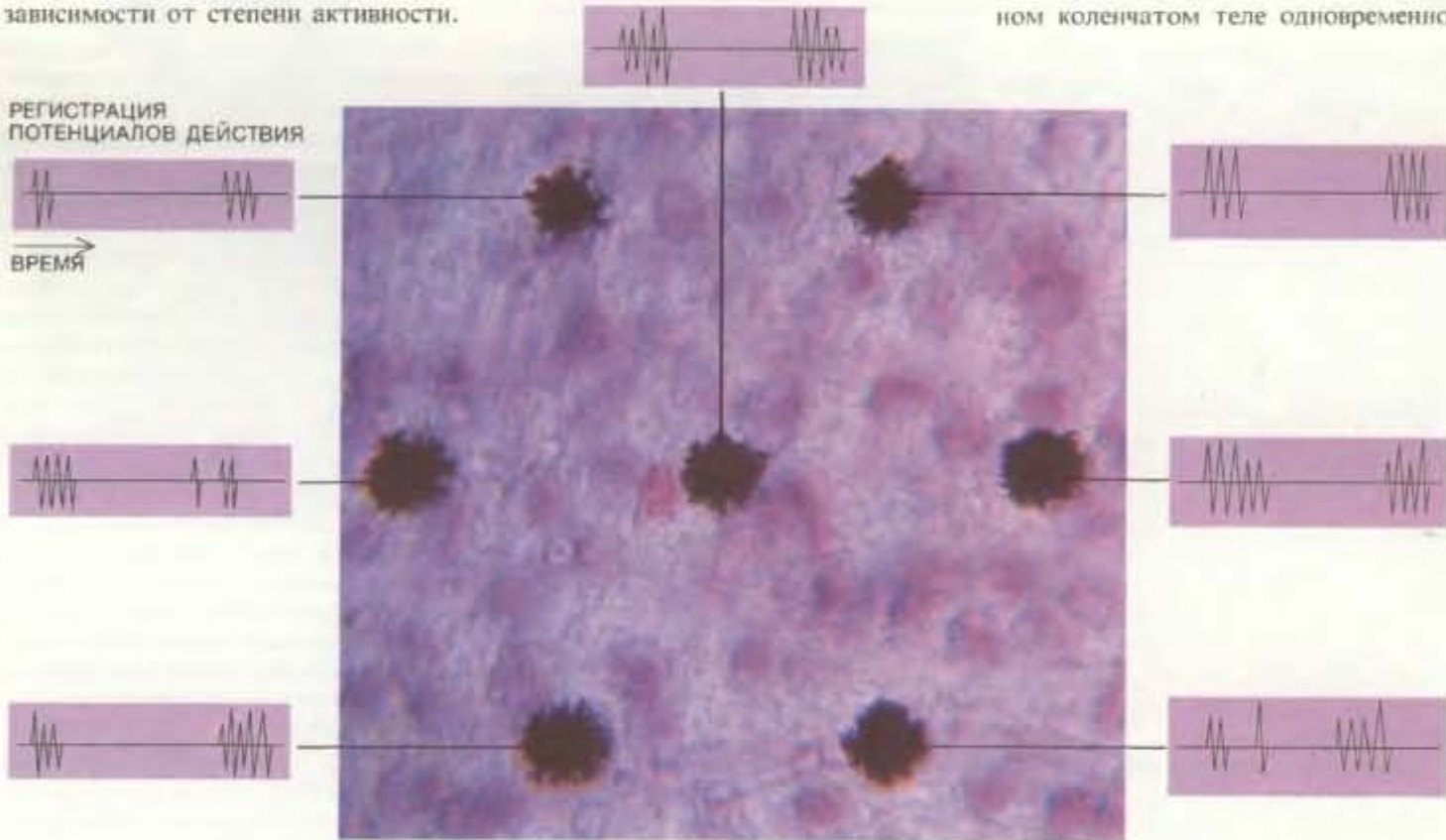
Для изучения такой системы спонтанно возбуждающихся клеток следовало одновременно регистрировать импульсную активность большого числа ганглиозных клеток развивающейся сетчатки, причем по мере формирования глазоспецифичных слоев. Это удалось сделать благодаря крупному техническому достижению. В 1988 г. Дж. Пайн из Калифорнийского университета и его сотрудники, в том числе аспирант М. Мейстер, разработали специальный прибор для мультитектродной микроэлектродной регистрации. В этом устройстве на плоскости гексагонально упакован 61 отводящий микроэлектрод, каждый из которых может регистрировать активность одной или нескольких клеток. Когда Мейстер, получив докторскую степень, продолжил свои исследования в Станфордском университете в сотрудничестве с Д. Бейлором, мы предприняли совместную работу с целью выяснить возможность применения этого мультитектродного устройства для изучения спонтанной активности ганглиозных клеток сетчатки у эмбрионов.

В таких экспериментах нужно было выделять сетчатку целиком из глаза плода и размещать ее в устройстве так, чтобы слой ганглиозных клеток прилегал к микроэлектродам. (Ввести набор микроэлектродов в глаз находящегося в утробе плода технически не представлялось возможным.) Австралийская исследовательница Р. Уонг, работавшая в моей лаборатории после получения докторской степени, добилась успешного выделения сетчатки и подобрала такую среду, что переживающая ткань часами оставалась в хорошем состоянии.

Когда полоска неонатальной сетчатки размещалась на мультитектродном устройстве, можно было одновременно регистрировать активность не менее 100 клеток. Наша работа подтвердила результаты исследований *in vivo* Галли-Реста и Маффеи. Все клетки в полоске возбуждались закономерно и ритмично с интервалом около 5 секунд одна от дру-

РЕГИСТРАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЕЙСТВИЯ

ВРЕМЯ



ИМПУЛЬСНАЯ АКТИВНОСТЬ развивающейся сетчатки выявляется с помощью микроэлектродов (черные пятна), которые регистрируют внеклеточные токи, возникающие в моменты генерации потенциалов действия ганглиозными

клетками (фиолетовые). Все клетки импульсируют одновременно, оставаясь затем в покое до следующего возбуждения. Представленная здесь область составляет около 3% общей площади сетчатки.

гой. Вспышки активности продолжительностью в несколько секунд перемежались периодами покоя от 30 до 120 секунд. Эти данные демонстрировали действительную скоррелированность активности ганглиозных клеток. В дальнейшем обнаружилось, что активность в близлежащих клетках коррелирует в большей степени, нежели между удаленными друг от друга.

Примечательно, что пространственное распределение импульсации таково, как если бы по сетчатке проходила волна активности со скоростью 100 мкм/с (что составляет от 0,01 до 0,1 скорости распространения одиночного импульса). После периода покоя возникает новая волна, но она распространяется уже в другом, очевидно случайном, направлении. Эти спонтанно генерируемые волны импульсной активности в сетчатке наблюдаются в течение всего периода формирования глазоспецифичных слоев, исчезая лишь непосредственно перед началом осуществления зрительной функции.

С инженерной точки зрения такие волны отлично подходят для обеспечения необходимых корреляций в импульсации соседних ганглиозных клеток. Кроме того, они гарантируют достаточную временную задержку, благодаря которой синхронизованное возбуждение ганглиозных клеток остается локальным, а не захватывает всю сетчатку. Этот характер импульсации позволяет достичь точной топографической организации клеточных слоев в наружном колленчатом теле соответственно информации, передаваемой по аксонам ганглиозных клеток сетчатки. А из того факта, что направление распространения волны случайно, следует весьма малая вероятность синхронного возбуждения ганглиозных клеток разных глаз, что очень важно для формирования глазоспецифичных слоев.

Будущие эксперименты, в которых предполагается разрушать волны активности, должны прояснить, действительно ли они участвуют в процессе развития межнейронных связей. Важно также установить, могут ли клетки наружного колленчатого тела распознавать и использовать скоррелированность импульсации ганглиозных клеток для усиления соответствующих синаптических связей или же для ослабления ошибочных. По всей видимости, могут: Р. Муни из моей лаборатории совместно с Д. Мадисоном из Станфордского университета показал, что уже на этом раннем этапе развития существует долговременная потенциация синаптической передачи между ганглиозными клетками и

нейронами колленчатого тела. Таким образом, можно констатировать, что еще до начала зрительной функции ганглиозные клетки способны к спонтанной импульсации, способствующей установлению необходимых межклеточных связей.

Представляет ли сетчатка особый случай или же многие отделы нервной системы на ранних стадиях развития генерируют эндогенную активность? Предварительные данные М. О'Донована из Национальных институтов здоровья свидетельствуют о скоррелированности активности мотонейронов спинного мозга в раннем онтогенезе. Похоже, и в этой системе для отбора связей в зависимости от точной активности может использоваться спонтанная генерация импульсов. Как и в случае зрительной системы, такие сигналы могли бы уточнять первоначально множественные диффузные связи в иннервируемом органе-мишени.

НЕОБХОДИМОСТЬ нейронной активности для полного развития мозга имеет ряд преимуществ. Прежде всего, при этом нервная система по мере созревания может, оставаясь в некоторых пределах, модифициро-

ваться и под влиянием опыта самонастраиваться, достигая той или иной степени приспособляемости. У высших позвоночных процесс усовершенствования может занимать длительный период. Так, в зрительной системе приматов он, начинаясь еще в утробе матери, продолжается в неонатальный период жизни, когда играет важнейшую роль в координации входных влияний от двух глаз. Эта координация нужна как для бинокулярного зрения, так и для стереоскопического восприятия пространства.

Первая активность дает то преимущество, которое можно назвать генетической экономностью процесса развития. В противном случае, т. е. при точной спецификации каждого межнейронного соединения посредством молекулярных меток для тысяч связей, образующихся в формирующемся мозге, потребовалось бы огромное количество генов. А описанные здесь «правила» межнейронных перестроек посредством спонтанной активности намного экономичнее. И основным вопросом дальнейших исследований является выяснение клеточных и молекулярных основ этих правил.

Перевод В. Гулева

Наука и общество

Роботы из отходов

КАК ТОЛЬКО в рабочей комнате Марка Тилдена в Университете Ватерлоо в Онтарио зажигается свет, посетители иногда приходят в изумление от увиденного: роллер начинает перемещаться по комнате, а хоппер подпрыгивать. Принцип действия этих светочувствительных роботов, сделанных Тилденом, основан на биологии, электричестве, эстетике и механике — БЭЭМ, как сокращенно это назвал сам Тилден. На отполированных до блеска латунных и стальных рамках закреплены отслужившие свой срок двигатели, солнечные элементы, когда-то работавшие в карманных калькуляторах, и шарикоподшипники от старых барабанов компьютерных принтеров.

Несмотря на то что рабочий кабинет Тилдена находится в здании университета, сам он не сидит на месте, а бывает всюду, внимательно наблюдая за окружающим и расширяя свой кругозор. Ни одно из изображений его грациозных и похожих на пауков созданий из металла и кремния

еще не появлялось на страницах журналов. Тем не менее сделанные Тилденом роботы можно видеть не только в его лаборатории, но также в учебных мастерских средних школ, и они даже демонстрировались в Санта-Фе (шт. Нью-Мексико), когда в июне нынешнего года там проводилась Третья конференция по проблемам искусственной жизни.

Используя только уже отработавшие свой срок электронные и механические изделия, Тилден и себя, и своих сотрудников заставляет творчески мыслить и избегать традиционных подходов к конструированию, которые далеки от того, чтобы учитывать биологические законы. Затраты на построение БЭЭМ-роботов не должны превышать нескольких долларов. Щедрые субсидии и заказы на сумму в несколько миллионов долларов — все это за дверями лаборатории. Лишь иногда, только в самых крайних случаях, Тилден прибегает к использованию покупных компонентов.

Инженер по обслуживанию вычислительной техники в университете днем и конструктор роботов ночью Тилден создал не менее 32 различных

роботов из никому не нужных выброшенных электрических и механических узлов и деталей. Первые его творения были самыми простыми; те же, что сделаны в последнее время, уже могут ходить. Отражают ли они своеобразную эволюцию? «Эволюцию? Кому это хочется эволюционировать? Если вы не можете выжить, то вы не более чем колбасный фарш в консервной банке!» — сказал Тилден.

Выживание — это способность непрерывно работать из года в год без ремонта. Это означает, что конструкция должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать, скажем, падение с полки, и, кроме всего прочего, это означает возможность функционирования при минимуме «мозгов». Среди самых простых творений Тилдена можно найти солароллеры, представляющие собой роботы на колесах, приводимые в движение «солнечным светом» от настольной лампы, а также хопперы, которые остаются неподвижными в течение длительного времени, терпеливо накапливая энергию в конденсаторе, а затем вдруг подпрыгивают почти на полметра вверх. Не имеющие пока никакого практического применения, все эти творения можно считать прототипами будущих БЭЭМ-роботов, которые будут уметь адаптировать свое поведение к окружающей обстановке.

На конференции в Санта-Фе всеобщим любимцем был робот, оживающий при свете (также роботы Тилдена называют светоядными) и прозванный четырехгранным турботом. Турбот движется, перекачиваясь с одной из его четырех треугольных граней на другую, приподнимаясь и затем переваливаясь с помощью вращающегося рычажка. При сильном свете турбот остается в ограниченной зоне, а в полумраке он чаще балансирует на гранях и движется хаотично на более протяженной территории.

В мастерских средней школы, где учащиеся познают хитрости робототехники, Тилден подготовил новое поколение молодых конструкторов. Лучшие из последних работ школьников представляются на ежегодной молодежной Олимпиаде по робототехнике, которую проводит Тилден. Те, кто уже не учится в школе, тоже прислали своих «ползучиков» и «прыгунчиков», собранных по методике БЭЭМ, и они участвовали в соревнованиях по прыжкам в высоту, лазанию по канату и борьбе сумо, а также в поиске выхода из лабиринта и в скоростных гонках солароллеров. Проводимая ежегодно весной, эта олимпиада послужила причиной огромного потока писем с вопросами о прави-



МАРК ТИЛДЕН конструирует крошечных роботов из деталей отработавших свой срок плейеров, калькуляторов и другой современной электронной аппаратуры. (Фото: Майкл Месснер.)

лах участия в ней и с просьбой прислать проспект, содержащий инструкции для желающих продемонстрировать свои творения.

Восхищаясь огромными возможностями простейших схем, Тилден задает себе вопрос: потребуется ли когда-нибудь его созданиям нечто, похожее на мозг? В этой связи он рассказывает историю о мухе, которая прошлой зимой в течение многих дней кружила около одного окна в его квартире. Он перенес на окно стеклоочиститель, действующий от солнечного света, чтобы муха не переставала двигаться. Затем, после получасового макетирования он собрал электронную схему для механической мухоловки. За несколько часов БЭЭМ-стеклоочиститель загнал-таки муху в ловушку, и дверца медленно закрылась за ней. На следующий день Тилден обнаружил мертвую муху под окном, где по прошествии некоторого времени ее подобрал БЭЭМ-полотер.

Тилден с недоверием относится к использованию в области искусственного интеллекта обычных подходов. «Нельзя впихнуть мозг в тело робота и надеяться, что после этого он будет способен делать что-нибудь полезное или интересное», — считает он. Тилден упрекает инженеров, занимающихся проблемой искусственного интеллекта, в том, что они закладывают в программное обеспечение слишком много управляющих функций низкого уровня, когда простые схемы или просто механизмы могли бы справиться с этим.

Тилден не единственный, кто считает, что для овладения робототехникой нужно начинать с самых простейших моделей. Родни Брукс, руководитель лаборатории микророботов в Массачусетском технологическом институте, разделяет эту точку зрения. Брукс первым начал делать простые шагающие роботы, в которых вместо компьютера используется всего несколько микросхем. Сам Тилден считает, что интерес к «живым» механизмам возник у него после услышанной им лекции Брукса, прочитанной в октябре 1989 г. В этой лекции Брукс излагал свое понимание архитектуры роботов и ввел понятие сподчиненности. Его точка зрения сводится к тому, что сложное поведение у робота возможно лишь тогда, когда в нем присутствуют элементы более простого поведения, которые в совокупности реализуют сложные поведенческие функции.

На конференции в Санта-Фе Тилден в конце концов встретил своего наставника, где его экспонаты вопреки воле их создателя отвлекли внимание публики от единственного большого «насекомого», которого Брукс привел на это собрание ученых. Сейчас Тилден думает над проблемой будущего — о сосуществовании и взаимодействии роботов, выполняющих биологические, электронные, художественные и механические функции. Можно надеяться, что они будут лучше ладить между собой, чем с мухами.

А. К. Дюдни

Зрительный образ В СОЗНАНИИ И В МОЗГЕ

Анализируя различные атрибуты образов, мозг констатирует видимый мир. Необычные формы слепоты демонстрируют, что происходит при нарушении работы определенных областей коры

СЕМИР ЗЕКИ

ИЗУЧЕНИЕ зрительной системы — в высшей степени философское занятие. Оно ставит вопрос о том, как мозг приобретает знание о внешнем мире, а ответить на этот вопрос непросто. Зрительные стимулы, доступные мозгу, требуют различных способов кодирования информации. Длина волны света, отраженного от поверхности, меняется в зависимости от освещения, однако для мозга цвет предмета остается прежним. Проекция на сетчатку руки жестикулирующего оратора в любое мгновение отличается от проекции в предыдущий момент, но мозг должен воспринимать именно руку. Изображение предмета зависит от расстояния, а мозг оценивает его истинный размер.

Таким образом, задача мозга — вычленил постоянные (инвариантные) признаки объектов из непрерывно меняющегося потока поступающей от них информации. Интерпретация неотделима от ощущения. Следовательно, чтобы осознать увиденное, мозгу недостаточно просто анализировать изображения, проецируемые на сетчатку; он должен активно конструировать видимый мир. Чтобы обеспечивать это, развился сложный нервный механизм, работающий настолько эффективно, что лишь после ста лет исследований ученые сумели догадаться о его многокомпонентной природе. В самом деле, когда неврологи, изучая мозговые расстройства, впервые столкнулись с некоторыми загадками зрительной системы мозга, непривычные толкования собранных данных поначалу отбрасывались ими как невероятные.

Отличительная черта этого механизма — сложное разделение труда. Оно проявляется анатомически в существовании особых корковых зон и их частей, специализированных на выполнении определенных зрительных функций. В патологических случаях это выражается в неспособности человека осознавать те или иные аспекты видимого мира, когда поврежден соответствующий мозговой механизм. Парадоксально, но такое подразделение и специализация обычно никак не проявляются на уровне восприятия. Таким образом, при изучении зрительной коры перед нами встает сложная задача: попытаться понять, как взаимодействуют ее компоненты, давая целостную картину мира без всяких признаков разделения

ПРИ РАССМАТРИВАНИИ человеком любого объекта различные зоны коры его мозга анализируют различные атрибуты объекта, в том числе цвет, форму и движение. «Видение» и понимание увиденного происходят одновременно благодаря синхронизации активности этих зон. Видимый человеком мир в каком-то смысле конструируется зрительной системой его головного мозга.



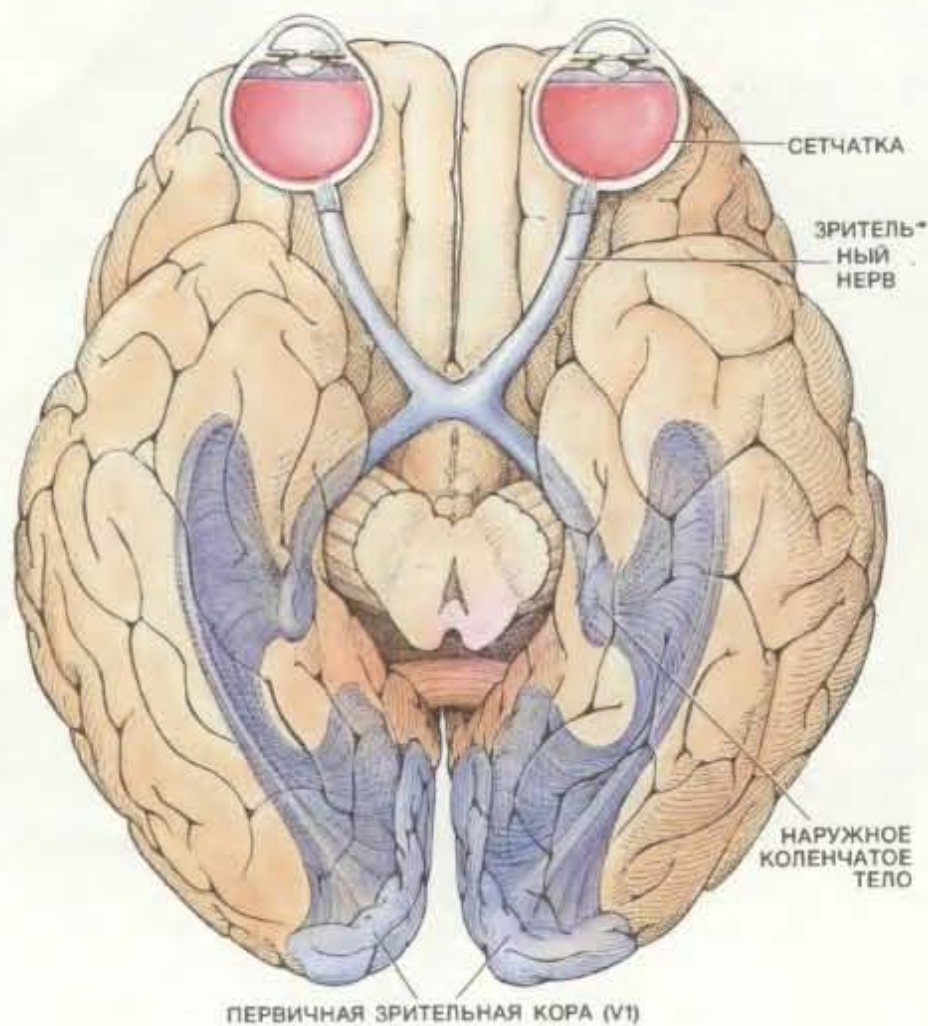
труда, потребовавшегося для создания этой картины. Другими словами, как удается видеть больше, чем лежит перед глазами?

Современные представления о зрительных структурах мозга сформировались только в два последних десятилетия. Неврологи старшего поколения начиная с конца XIX в. представляли их совсем иначе. Опираясь на ошибочную мысль о передаче зрительных «кодов» светом, отраженным от объекта или излучаемым объектом, они считали, что изображение «отпечатывается» на сетчатке, примерно так же как на фотопластинке. Затем такие отпечатки передаются в зрительную кору, которая анализирует закодированную в них информацию. Процесс ее расшифровки и приводит к «видению». Понимание увиденного, т. е. придание смысла зрительному «отпечатку», различие в нем тех или иных объектов считались особым процессом, требующим ассоциации новых впечатлений со сходными, но полученными ранее.

Такое представление о работе мозга, просуществовавшее до середины 1970-х гг., имело глубокую философскую подоплеку, хотя сами неврологи никогда этого не признавали. Ощущение отделялось от понимания, а «заведывали» ими различные области коры. Истоки такой дуалистической доктрины неясны, но она напоминает взгляды Иммануила Канта, согласно которым первая из этих способностей — пассивная, а вторая — активная.

Подтверждение своей концепции неврологи видели в том, что сетчатка связана главным образом с определенной частью головного мозга — стриарной, или первичной, зрительной корой, называемой также зоной VI (от англ. visual — зрительный. — *Ред.*). Эта связь осуществляется с высокой топографической точностью: зона VI фактически содержит «карту» всей поверхности сетчатки. Зона VI и сетчатка соединяются через подкорковую структуру, называемую наружным коллатеральным телом и содержащую шесть слоев клеток. Четыре верхних слоя являются мелкоклеточными, два нижних — крупноклеточными. Много лет назад покойный невролог С. Хеншен из Уппсальского университета предположил, что функция крупных клеток заключается в «собирании света», а мелких — в регистрации цветов. Его основополагающая гипотеза о функциональной основе анатомического разделения приобрела особое значение в последние годы.

Со временем неврологи обнаружили, что поражение любого участка нервного пути, связывающего сетчатку с зоной VI, приводит к появлению поля абсолютной слепоты, размеры и положение которого точно соответствуют протяженности и локализации повреждения в зоне VI. Исходя из этих наблюдений Хеншен пришел к вы-



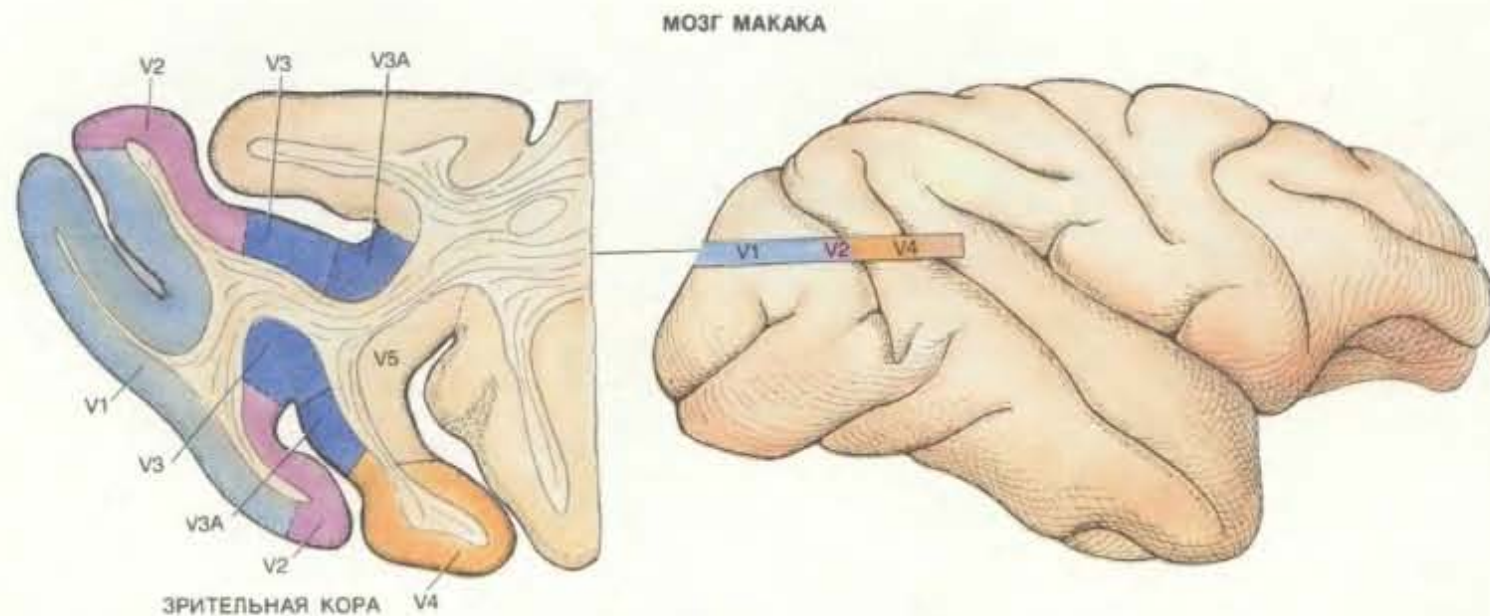
АНАТОМИЧЕСКОЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ зрительной системы головного мозга — физическая основа зрения. Большинство путей, ведущих от сетчатки к зрительной коре в задней части полушарий, проходит через наружное коленичатое тело. На поперечном срезе этой подкорковой структуры видны шесть клеточных слоев, два из которых соответствуют магноцеллюлярным связям (M), а четыре — парвоцеллюлярным (P).

воду, что зона V1 является «корковой сетчаткой», т. е. местом, где происходит «видение».

Более того, как показал в конце XIX в. немецкий психиатр П. Флексиг из Лейпцигского университета, определенные зоны головного мозга, в том числе и V1, уже при рождении

выглядят зрелыми, тогда как другие (в частности, корковые области, окружающие V1) продолжают развиваться, как если бы их созревание зависело от приобретаемого опыта. По мнению Флексига и большинства других неврологов, из этого следует, что зона V1 представ-

ляет собой «место вхождения зрительной лучистости в орган души», а области вокруг нее соответствуют вместилищам высших «психических» функций (Cogitationzentren — мыслительных центров), связанных со зрением. Эту теорию подкрепляли довольно спорными данными, соглас-



ЗРИТЕЛЬНАЯ КОРА макака. На поперечном срезе мозга (слева), сделанном на указанном справа уровне, видны

часть первичной зрительной коры (V1) и некоторые зрительные зоны престриарной коры (V2 — V5).

но которым поражения так называемой ассоциативной зрительной коры (но не зоны V1) могут привести к «психической слепоте» (Seelenblindheit) человека, видящего, но не осознающего увиденное.

УДИВИТЕЛЬНО, но именно изучение ассоциативной зрительной коры в конечном итоге опровергло этот дуалистический взгляд на организацию зрительных процессов в мозге. Работы, выполненные в 1970-х гг. Дж. Олманом и Й. Каасом из Висконсинского университета на обезьянах дурукули (*Aotes trivirgates*) и автором статьи на макаках, показали, что ассоциативная зрительная кора (лучше называть ее престриарной) включает несколько различных зон, отделенных от V1 еще одной зоной — V2. Поворотным пунктом в понимании того, как мозг конструирует зрительный образ, стала продемонстрированная мною впоследствии специализация этих зон на выполнении различных задач.

В своих физиологических исследованиях я предъявлял макакам набор стимулов (цвета, линии различной ориентации и точки, движущиеся в разных направлениях) и с помощью электродов регистрировал активность клеток престриарной коры. Оказалось, что в так называемой зоне V5 (нейроанатомическая терминология до конца не устоялась, и некоторые специалисты предпочитают вместо V5 использовать обозначение MT) все они ответственны за восприятие движения, причем в большинстве случаев строго определенного направления, но никогда не реагируют на цвет движущегося стимула. Это навело меня на мысль о специализации V5 на видении движения.

И, напротив, я обнаружил, что подавляющее большинство клеток зоны V4 в некоторой степени избирательно реагируют на свет той или иной длины волны, а многие из них специализированы и на определенной ориентации линий (т. е. составляющих формы). Почти все клетки двух соседних областей V3 и V3A также избирательны в отношении формы, но, как и в случае V5, практически безразличны к цвету стимула.

Эти результаты позволили мне выдвинуть в начале 1970-х гг. концепцию функциональной организации зрительной коры, согласно которой цвет, форма, движение и, возможно, другие атрибуты видимого мира обрабатываются мозгом по отдельности. Поскольку сигналы к таким специализированным зонам идут преимущественно от V1, из мо-

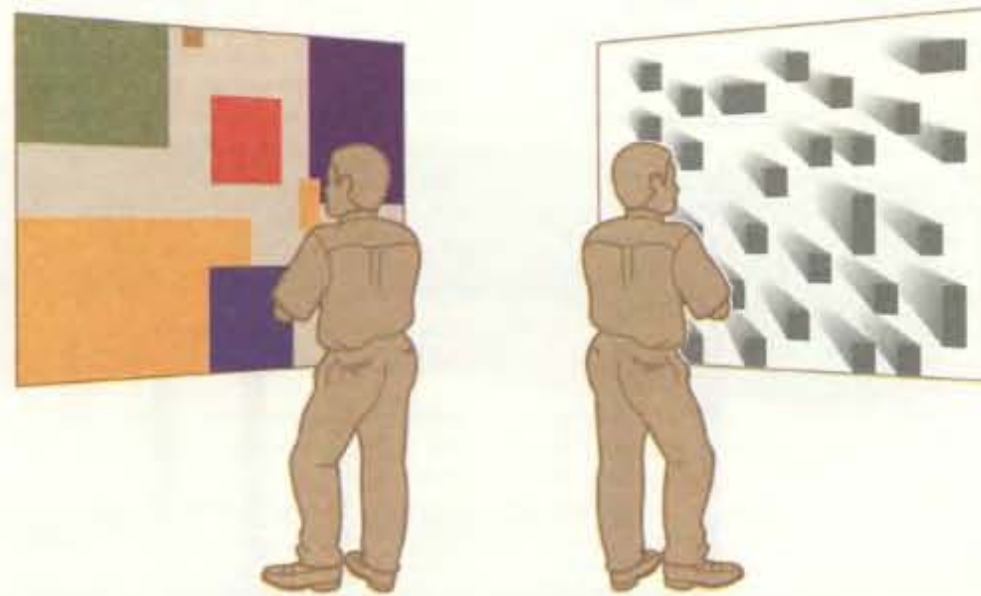
его предположения следовало, что у этой области, как и у V2, принимающей сигналы от V1 и связанной с теми же самыми зонами, также должна быть функциональная специализация. Возможно, две эти области действуют как своего рода почтовые отделения, сортирующие сигналы в зависимости от места назначения.

В последние годы новые методы окрашивания тканей в сочетании с физиологическими исследованиями дали первое подтверждение такой теории и позволили выявить специфические нервные пути, распространяющиеся от V1 по всей престриарной коре.

С появлением позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ), дающей возможность измерять колебания

кровотока в отдельных участках мозга при выполнении человеком определенных заданий, мы с коллегами из Хаммерсмитской больницы в Лондоне начали использовать данные, полученные в экспериментах с обезьянами, для непосредственного изучения головного мозга человека. Мы обнаружили, что, когда люди с нормальным зрением рассматривают мозаику Лэнда в стиле Мондриана* (абстрактную картину

* По имени разработавшего этот текст психофизика Э. Лэнда. Пит Мондриан (1872—1944) — голландский живописец, создатель неопластицизма — абстрактных композиций из прямоугольников, окрашенных в основные цвета спектра. — Прим. пер.



РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ОБЪЕКТОВ стимулируют неодинаковые участки зрительной коры. Как показывает изучение кровотока в отдельных участках мозга, яркое полотно в стиле Мондриана сильно активизирует зону V4, а движущиеся черно-белые фигуры — зону V5. Оба типа объектов приводят также к активации зон V1 и V2 — функционально менее специализированных и распределяющих сигналы по другим корковым зонам.

из цветных прямоугольников без конкретных различимых объектов), значительнее всего кровотоков усиливается в структуре, называемой веретенообразной извилиной. По аналогии со сходным участком мозга макака мы обозначили эту корковую область как «зона V4 человека». Совершенно иной результат наблюдается при рассмотрении черно-белого изображения движущихся прямоугольников: максимальная интенсивность кровотока регистрируется в более латеральной области — «зоне V5 человека».

Продемонстрированная нами раздельная обработка информации о цвете и движении — прямое доказательство существования функциональной специализации в зрительной коре человека. Метод ПЭТ позволил сделать еще одно интересное открытие: при обоих типах стимуляции в

зоне VI (а возможно, и в соседней с ней V2) также заметно усиливается кровоток. Вероятно, у человека, как и у обезьяны, они распределяют сигналы по различным участкам престриарной коры.

Ключ к работе распределительной системы этих зон заключается в их структурно-функциональной организации. Область VI необычно богата клеточными слоями, а методика окрашивания, впервые примененная М. Уонг-Райли из Висконсинского медицинского колледжа в Милуоки, демонстрирует еще более сложную ее архитектуру. Органеллы, называемые митохондриями, содержат фермент цитохромоксидазу, необходимый для обмена энергии в клетке. Окрашивая какой-либо участок мозга на присутствие этого фермента, можно выявить клетки с наибольшей метаболической активностью.

Согласно результатам окрашивания, метаболическая архитектура зоны VI характеризуется наличием колонок клеток, идущих от поверхности коры к нижележащей нервной ткани — так называемому белому веществу мозга. Если рассматривать их на срезе, параллельном поверхности коры, эти колонки выглядят сильно окрашенными пятнами или пузырьками, отделенным друг от друга более светлыми областями. М. Ливингстон и Д. Хьюбел из Гарвардской медицинской школы обнаружили, что клетки, избирательно реагирующие на определенную длину волны, сконцентрированы именно в таких пузырьках, а клетки, воспринимающие форму, — в областях между пузырьками.

Колонки особенно четко заметны во втором и третьем слоях зоны VI, получающих сигналы от парвоцел-

люлярных слоев наружного колленчатого тела. Клетки этих его частей мощно и устойчиво реагируют на зрительные стимулы, причем многие из них — на цветовые.

Особый набор структур можно различить в слое 4В зоны VI, получающем сигналы от магноцеллюлярных слоев наружного колленчатого тела, клетки которых реагируют на стимулы кратковременно и по большей части безразличны к цвету. От 4В отходят пути к зонам V5 и V3. Клетки 4В, связанные с V5, собраны в мелкие группы, окруженные клетками, общающимися с другими зрительными зонами. Короче говоря, организация слоя 4В зоны VI говорит о специализации определенных ее частей на восприятии движения и о том, что они отделены от областей с другими функциями.

Зона V2, как и VI, обладает особой метаболической архитектурой, однако она образована широкими и узкими полосами, отделенными друг от друга менее интенсивно окрашиваемыми межполосными областями. Как показали исследования Э. Дейоу, Д. Ван Эссена из Калифорнийского технологического института, Хьюбела, Ливингстон и С. Шиппа из Лондонского университетского колледжа и автора статьи, клетки, избирательно реагирующие на определенную длину волны, сосредоточены в узких полосах, на направление движения — в широких, а чувствительные к форме распределены как в широких полосах, так и в областях между полосами.

Таким образом, в VI и V2 как бы находятся ячейки, где собираются различные сигналы перед передачей их в специализированные зрительные зоны. Клеткам этих ячеек соответствуют маленькие рецептивные поля, т. е. они реагируют только на стимулы, попадающие на крошечные участки сетчатки. Кроме того, они регистрируют информацию только о специфических атрибутах окружающего мира в пределах своего рецептивного поля. VI и V2 как бы осуществляют пофрагментный анализ всего поля зрения.

Это позволяет говорить о четырех параллельных системах, соответствующих различным аспектам зре-

ния: одна для движения, одна для цвета и две для формы объектов. Судя по всему, наиболее отличаются друг от друга системы, которые воспринимают движение и цвет. В первом случае главная престриарная зона — это V5; сигналы сюда идут от сетчатки через магноцеллюлярные слои наружного колленчатого тела и слой 4В зоны VI, откуда они попадают к месту назначения как прямо, так и через широкие полосы V2. Цветовая система зависит от зоны V4; импульсы поступают к ней непосредственно или через узкие полосы V2 от пузырьков зоны VI, а к ним проходят от сетчатки через парвоцеллюлярные слои наружного колленчатого тела.

Из двух формовоспринимающих систем одна, в конечном счете, связана с цветовой, а вторая от нее не зависит. Первая находится в зоне V4 и получает сигналы от парвоцеллюлярных слоев наружного колленчатого тела через межпузырьковую часть VI и межполосную V2. Вторая локализована в зоне V3 и больше связана с динамическими формами, т. е. очертаниями движущихся объектов. К ней сигналы идут от магноцеллюлярных слоев наружного колленчатого тела через слой 4В зоны VI, а затем напрямую или через широкие полосы V2.

Хотя четыре перечисленные системы обособлены друг от друга, анатомия зон VI и V2, а также непосредственные связи между специализированными зрительными областями представляют этим «ячейкам» многочисленные возможности сообщаться друг с другом. Следовательно, для выполнения своих функций престриарные зоны различным образом используют смесь сигналов парвоцеллюлярного и магноцеллюлярного происхождения.

Это удивительное разделение функций проявляется при некоторых патологиях, затрагивающих зрительную кору. Поражение ее специфических участков вызывает соответствующие характерные синдромы, обычно гораздо менее тяжелые, чем полная слепота, однако достаточно серьезные, чтобы привести больного в растерянность и отчая-

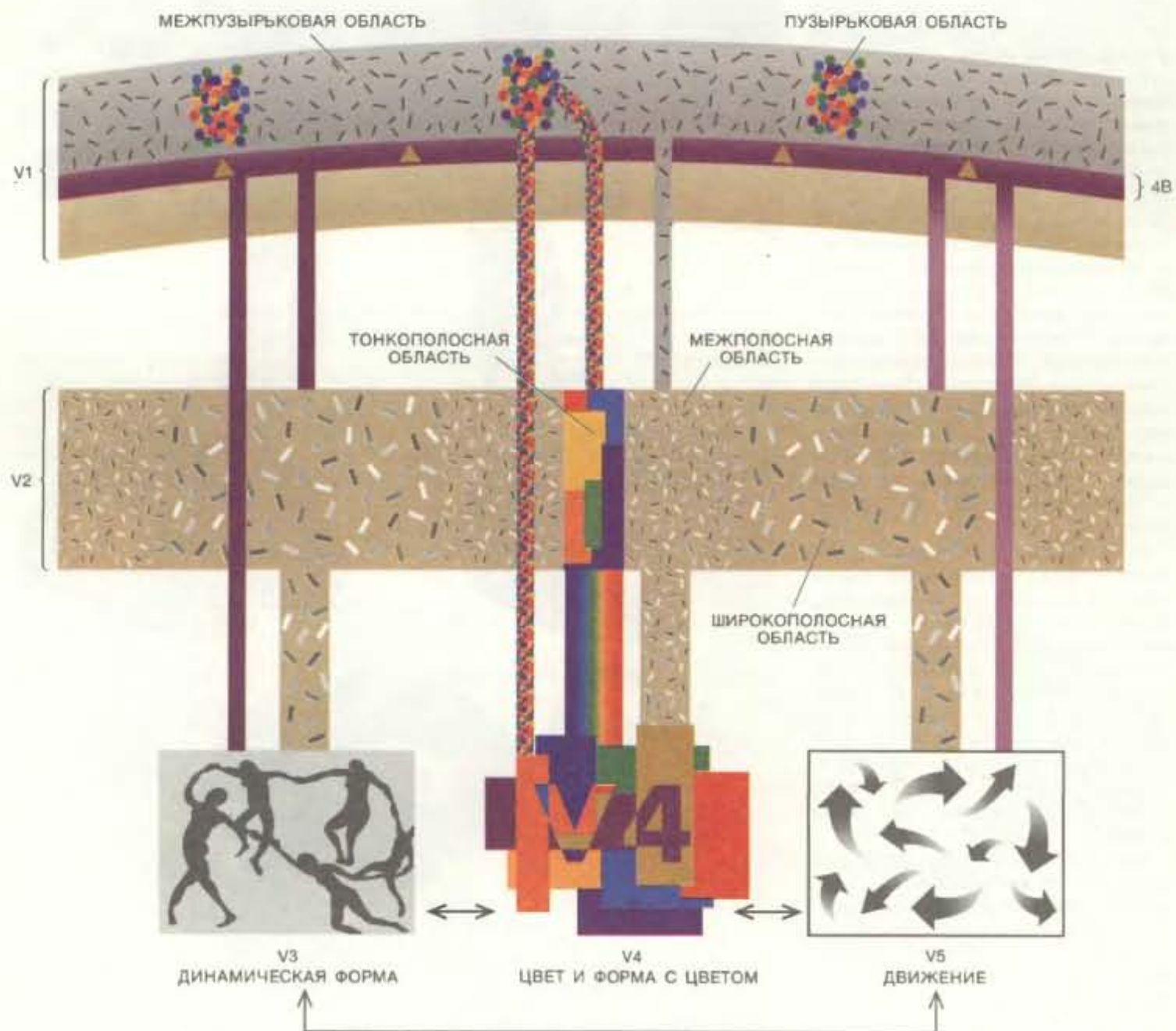
ние. Нарушения в зоне V4 ведут к ахроматопсии, при которой все окружающее видится лишь в оттенках серого цвета. Этот синдром отличается от обычной цветовой слепоты: больные не только не воспринимают и не осознают цветов, но и не могут даже вспомнить, какими они были до развития у них данной патологии. Тем не менее, если сетчатка и зона VI не поражены, осознание формы, глубины и движения не страдает.

Аналогичным образом, нарушения в зоне V5 ведут к акинетопсии: больные не видят и не осознают движение в окружающем мире. Если объекты неподвижны, они прекрасно воспринимаются, но, как только начинают двигаться, сразу «исчезают». Прочие аспекты зрения остаются нормальными, что непосредственно вытекает из функциональной дифференциации зрительной коры человека.

Поскольку системы восприятия формы и цвета в ней разделены, может показаться удивительным отсутствие случаев полной и специфической утраты способности видеть форму. Частично это объясняется тем, что подобная патология потребовала бы одновременного разрушения зон V3 и V4, т. е. отключения обеих зрительных систем, связанных с формой объектов. Такое поражение было бы почти наверняка достаточно обширным, чтобы захватить и зону VI, приведя тем самым к полной слепоте.

И все же некоторые больные с поражением престриарной коры страдают от частичного невосприятия формы, часто сочетающегося с ахроматопсией. Этим людям обычно гораздо труднее идентифицировать неподвижные объекты, чем движущиеся. Нередко они предпочитают смотреть телевизор, а не наблюдать реальный мир, поскольку на телеэкране преобладает движущееся изображение. Сталкиваясь с неподвижными объектами, эти люди часто для облегчения их распознавания двигают головой. Можно предположить, что информацию об их очертаниях они получают через систему динамических форм, связанную с зоной V3.

Функциональная специализация зрительной коры проявляется и в синдроме, который я назвал хроматопсией («цветовым видением») при отравлении угарным газом. Это состояние время от времени описывалось в медицинской литературе, однако до открытия обсуждаемой функциональной специализации на него не обращали серьезного внима-



ЧЕТЫРЕ ПЕРЦЕПТИВНЫХ ПУТИ, выявленные в зрительной коре. Цвет воспринимается, когда избирательно реагирующие на определенную длину волны клетки в пузырьковых областях V1 посылают сигналы в специализированную зону V4 и узкие полосы V2, также связанные с V4. Восприятие формы в сочетании с цветом зависит от связей межпузырьковых участков V1, межполосных областей V2 и зоны V4. Клетки слоя 4В зоны V1 посылают сигналы к специализированным зонам V3 и V5 как непосредственно, так и через широкие полосы области V2; эти связи обеспечивают восприятие движения и динамической формы.

ния. Некоторые люди, выжившие после чреватого летальным исходом вдыхания дыма при пожаре, часто страдают диффузным поражением коры из-за отравления окисью углерода, резко ухудшающей снабжение тканей кислородом. В результате их зрение обычно сильно портится во всех отношениях, кроме одного: восприятие цвета вообще или почти не ухудшается. Поскольку окраска объектов — единственный вид доступной им зрительной информации, они пытаются (часто безуспешно) идентифицировать окружающее только по этому признаку. Например, любой синий объект может казаться им океаном.

ИТАК, мы знаем, что поражение всей зоны VI ведет к полной неспособности получать какую-либо зрительную информацию, а поражение одной из специализированных зон — к недоступности и неосознаваемости соответствующего ей атрибута видимого мира. Возникает вопрос: какие последствия вызвало бы непосредственное поступление сигналов от наружного коллатерального тела в специализированную зону в обход VI? Природа сама поставила такой эксперимент, и его результаты позволяют лучше понять функционирование зрительной коры.

Этот феномен называют «слепозрением». Впервые он был описан Э. Поппелем и его коллегами из Мюнхенского университета, а позднее весьма детально изучался группой Л. Вайскранца в Оксфордском университете. Люди в таком состоянии страдают полной слепотой из-за поражения зоны VI, однако в условиях эксперимента способны правильно распознавать разнообразные зрительные стимулы. Например, они могут различить направление движения или разницу в окраске. Эти способности несовершенны и не вполне надежны, но показываемые результаты лучше, чем при простом угадывании. Вместе с тем такие больные признаются, что абсолютно ничего не видят и часто удивляются, насколько точны их «догадки».

Как показали М. Юки из Токийского института неврологии и В. Фрис из Мюнхенского университета, описываемый феномен почти наверняка обусловлен существованием слабо выраженных, но прямых связей между наружным коллатеральным телом и престриарной корой. Однако не исключено участие и некоторых других, еще не открытых подкорковых путей к ее специализированным зонам. В любом случае есть

все основания предполагать, что у людей со слепозрением зрительные сигналы достигают престриарной коры.

СТРАДАЮЩИЙ слепозрением человек видит, но не осознает этого. Поскольку он подозревает о своем видении, никакой информации им не приобретается. Короче говоря, его «видение», которое стимулируется только в лабораторных условиях, совершенно бесполезно. Значит, для того чтобы зрительная кора выполняла свою функцию получения сведений об окружающем мире, необходима здоровая зона VI. Вероятно, она (и V2) нужна именно потому, что здесь начинается переработка информации перед более тонкой ее расшифровкой в специализирован-

ных престриарных зонах или же из-за возвращения в нее сигналов, возникающих в результате функционирования этих зон.

В медицинской литературе можно найти множество других примеров, проливающих свет на то, как предварительная переработка стимулов в зонах VI и V2 может вполне непосредственно и явным образом способствовать восприятию. Поражение зоны V5 приводит к потере способности различать направленность или взаимосвязь движений. Однако, как показал Р. Хесс из Кембриджского университета со своими коллегами, такие больные акинетопсией иногда осознают сам факт происходящего движения предположительно благодаря активации клеток в зонах VI и V2 (и, возможно, в других зо-

нах, получающих сигналы от магнотеллюлярных слоев). Аналогичным образом, изученный мною и Фрисом пациент с ахроматопсией способен различать световые волны разной длины, так как его зона VI пострадала лишь в небольшой степени, однако интерпретировать получаемую информацию как цвет он уже не может.

Дополнительные данные были получены при сравнении остаточной способности к восприятию формы у двух больных с патологиями коры, в определенном смысле комплементарными друг другу. У первого ее диффузное поражение, вызванное отравлением угарным газом, затронуло зону VI. Ему крайне сложно скопировать даже самые простые изображения типа геометрических

фигур или букв, поскольку формовоспринимающая система VI сильно пострадала.

У второго больного престриарная кора обширно поражена апоплексическим ударом, в общем не затронувшим зону VI. Он может воспроизвести набросок собора Св. Павла лучше многих здоровых людей, хотя ему и требуется для этого очень много времени. Однако того, что он нарисовал, этот человек не осознает. Поскольку его зона VI почти не пострадала, он способен идентифицировать отдельные элементы формы, например углы и простые контуры, и аккуратно копировать видимые и осознаваемые им линии. Однако патология престриарной коры не позволяет ему воспринять эти линии как единое сложное целое и распоз-

нать в них здание. Пациент видит и понимает только то, что позволяет ограниченные возможности его не пострадавшей зоны VI.

Остаточные способности этих больных демонстрируют важную особенность организации зрительной коры, а именно то, что ни одна из ее зон — даже «почтовые отделения» VI и V2 — не служит исключительно для передачи сигналов к другим участкам. Напротив, каждая из них активно участвует в преобразовании поступающих сигналов и, вероятно, в определенной степени, если не полностью, обеспечивает восприятие.

Четкое «разделение труда» внутри зрительной коры, естественно, ставит вопрос о взаимодействии специализированных зон друг с другом

Мир, воспринимаемый поврежденной корой

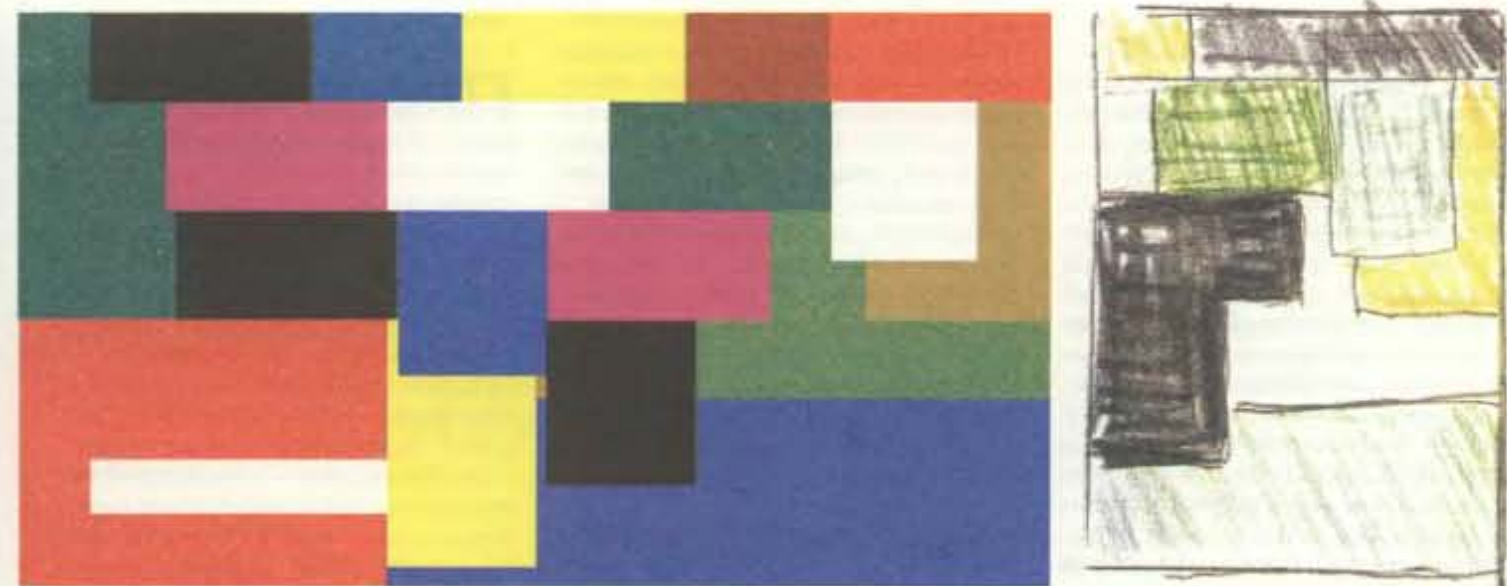
Поражения специализированных областей зрительной коры могут привести к необычным типам слепоты, при которых человек утрачивает способность воспринимать только один из атрибутов видимого мира, в частности цвет, форму или движение. Рисунки таких больных дают некоторое представление об особенностях восприятия окружающего мира, а также о функционировании самой зрительной коры.



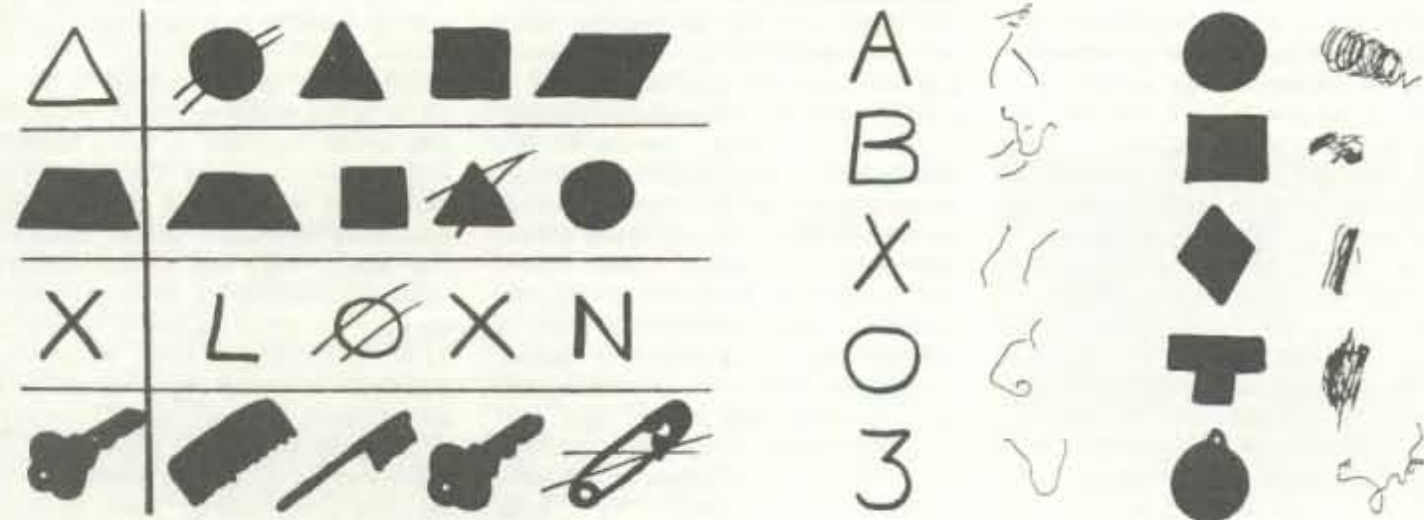
При поражении «цветовых» путей коры пропадает цветное зрение. На рисунках такого больного у банана, помидора и зеленых листьев одинаковая окраска.



У этого больного в результате кровоизлияния поражена престриарная кора, из-за чего нарушено восприятие формы. Он может скопировать рисунок, но не способен понять, что отдельные линии образуют изображение собора.



Когда человеку с ахроматопсией (цветовой слепотой) показывают мозаику Лэнда в стиле Мондриана (слева) и просят ее воспроизвести, он может с успехом скопировать очертания прямоугольников, но не окраску (справа).



Этот больной в результате отравления угарным газом лишился способности воспринимать форму. Он не может правильно выбрать, какое из четырех изображений иден-

тично предъявленному (слева), и скопировать простейшие рисунки (справа).



ТРЕУГОЛЬНИК КАНИША образован иллюзорными линиями. Нормальная зрительная кора воспринимает его, несмотря на их отсутствие на рисунке. Такого рода иллюзии показывают, что она должна разрешать конфликты между различными функциональными зонами.

при формировании полноценного образа. Простейшим решением была бы передача результатов их деятельности некой высшей зоне, синтезирующей поступающую информацию. В философском плане такое решение приводит к новому вопросу: кто (или что) воспринимает сложный образ и каким способом? Однако эта проблема сформулирована некорректно: анатомические данные не подтверждают существования единственной высшей области, с которой сообщались бы все рассмотренные ранее зоны. Напротив, они прямо или через другие области связаны между собой.

Например, друг с другом связаны зоны V4 и V5. От них отходят также пути к теменной и височной областям мозга, однако, как показано мною с коллегами, информация поступает там в специфические для каждой из них участки и непосредственное перекрытие сигналов от V4 и V5 минимально. Кора как будто стремится не допустить объединения различных типов зрительных сигналов. Такая стратегия применяется ею и в отношении памяти и других систем (см. статью П. Гольдман-Ракич «Оперативная память и разум» на с. 63). Любая интеграция сигналов в височной и теменной областях должна происходить за счет локальной «проводки», объединяющей входные стимулы еще до их прихода к месту назначения.

В самом деле, интеграция зрительной информации — колоссальная задача, требующая обширной сети анатомических связей между четырьмя параллельными системами на всех уровнях, поскольку каждый

из них вполне определенным образом способствует восприятию. Здесь также возникает ряд сложностей. Напротив, для понимания согласованного движения мозг должен определить, что в поле зрения движется в одном и том же направлении с одинаковой скоростью. Регистрирующие движение клетки специализированной зоны способны провести такое сравнение, поскольку их рецептивные поля крупнее, чем у клеток предыдущей инстанции в V1.

Однако, если их рецептивные поля крупнее, эти клетки неизбежно будут менее точно определять местоположение любого стимула в поле зрения. Чтобы пространственно организовать интегрируемую информацию, мозг должен каким-то образом соотносить ее с некой зоной, содержащей более точную топографическую карту сетчатки, т. е. поля зрения. Среди всех зрительных зон этому требованию отвечает в первую очередь V1, а затем — V2. Следовательно, специализированные зоны должны отсылать информацию назад — к V1 и V2, чтобы результаты сравнения стимулов снова наносились на карту поля зрения.

Обратные связи, позволяющие информации передаваться между различными зонами в обоих направлениях, необходимы также для разрешения конфликта между клетками, обладающими различными способностями, но реагирующими на одни и те же стимулы. Хороший пример такого конфликта демонстрируют реакции клеток зон V1 и V2 на иллюзорные контуры типа треугольника Каниша.

В этой знаменитой зрительной иллюзии нормальный наблюдатель различает треугольник среди представляемых ему форм, хотя линии, образующие его, не завершены: мозг сам конструирует их продолжение. Как показали Р. фон дер Хейдт и Э. Петерханс из Цюрихского университета, клетки V1 избирательно регистрирующие форму, не реагируют на эту иллюзию и не сигнализируют о присутствии каких-либо неизобразенных линий. Клетки V2 получают импульсы от V1, но, поскольку их рецептивные поля и аналитические возможности шире, реагируют на иллюзию, «подразумеваемая» недостающие линии. Для разрешения такого конфликта требуется, чтобы от этой зоны к соответствующим клеткам V1 шли обратные сигналы.

Другая сложность, возникающая в процессе интеграции, — проблема объединения. Клетки, реагирующие на один и тот же объект в поле зре-

ния, могут быть разбросаны по всей зоне V1. Следовательно, что-то должно объединить их сигналы, чтобы они воспринимались как относящиеся к одному объекту, а не к разным. Проблема еще острее, когда клетки двух или более зрительных зон реагируют на различные атрибуты увиденного.

Одна из возможностей разрешения этой проблемы — синхронизация клеточных импульсов. Она действительно до некоторой степени выражена у клеток, анатомически связанных между собой. Это показали исследования В. Зингера из Института мозга им. Макса Планка во Франкфурте. Однако тогда возникает вопрос: кто или что определяет такую синхронную активность? Обратные связи — по крайней мере частичное решение, объединяющее работу одной зоны с работой, происходящей в других зонах, посылающих ей информацию.

ПЕРЕЧИСЛЕННЫЕ проблемы привели меня и моих коллег к формулировке теории многоступенчатой интеграции. Согласно нашей концепции, интеграция протекает не в один этап путем конвергенции сигналов в некой «высшей» зоне и не откладывается до тех пор, пока все зрительные зоны завершат свои специфические операции. Напротив, интеграция зрительной информации — это процесс одновременного восприятия и осознания видимого мира.

Анатомическое «обеспечение» многоступенчатой интеграции колоссально: она требует обратных связей между всеми специализированными зонами, а также между ними и зонами V1 и V2, посылающими к ним сигналы. Наши исследования показывают, что такая система обратных связей действительно существует.

Обратные пути, идущие к V1 и V2, в корне отличаются от восходящих путей, ведущих от них к специализированным зонам. Прямые пути дискретны и широко разбросаны, поскольку сигналы к зонам, соответствующим тому или иному аспекту зрения, посылаются изолированными друг от друга группами клеток в V1 и V2. Обратные пути, напротив, диффузные и достаточно неспецифичны. Например, если зона V5 получает сигналы только от определенных групп клеток в слое 4B зоны V1, сама она стимулирует всю область клеток этого слоя, включая и те, что передают информацию в зону V3. Следовательно, такая система обратной связи выполняет одновременно три функции: объединяет и

синхронизирует сигналы о форме и движении, проходящие по двум различным зрительным путям, передает информацию о движении в зону с точной топографической картой и интегрирует информацию о движении, поступающую из зоны V5, с информацией о форме, направляемой в V3.

Аналогичным образом, если пути из V2 к специализированным зонам четко разделены, обратная связь этих зон с V2 осуществляется диффузно. От V4 сигналы идут не только к обеспечивающим ее информацией узким полосам и межполосным областям, но и к тем широким полосам, которые не имеют с ней восходящих связей. Следовательно, такая система позволяет объединить информацию о форме, движении и цвете.

Становится все более очевидно, что для получения головным мозгом полной информации об окружающем мире необходимо нормальное функционирование всей сети взаимосвязей внутри зрительной коры, включая нисходящие пути к зонам V1 и V2. Однако, как показывают примеры слепозрения, такая информация недоступна без ее осознания, являющегося, по-видимому, важней-

шим атрибутом правильной работы зрительного аппарата. Следовательно, нам вряд ли удастся детально разобраться в его функционировании, не затрагивая параллельно проблемы сознания (см. статью Ф. Крика и К. Коха «Проблема сознания» на с. 113).

ДВА последних десятилетия принесли много удивительных открытий в области исследования зрительной системы мозга. Более того, они радикально изменили наши представления о функциях этой системы и способах их осуществления. Уже невозможно, как это было в прошлом, отделять процесс «видения» от понимания увиденного, получение зрительной информации от ее осознания. В самом деле, ведь сознание — это свойство сложного нервного аппарата, развившееся для приобретения знаний.

Таким образом, интерес к зрительной системе мозга лежит в русле вечного стремления человечества познать свою природу. Конечно, понимание работы этой системы отнюдь не решает проблемы сознания. Однако это хороший подход к ее разгадке.

Перевод Ю. Амченкова

Наука и общество

Горячие муравьи

ОНИ ЖИВУТ в экстремальных условиях. Сахарские муравьи-бегунки питаются высохшей падалью, любят сильную жару и внезапно, хотя и на короткое время, массами появляются на поверхности земли. Когда температура поднимается выше 45°C и те счастливицы, которые не изжарились на солнце, прячутся на время «сиесты», почва пустыни вскипает. Сотни муравьев колонии *Cataglyphis bombycina* выкапывают из норы и в течение нескольких минут собирают сухие остатки менее удачливых членистоногих.

Как измученные зноем путешественники, которые часто останавливаются, чтобы утереть пот со лба, эти животные-падальщики отдыхают на редкой растительности. Они тратят на такое охлаждение до 75% своего надземного времени. Те особи, которые оказываются не способными отыскать высохшую травинку и ползти над почвой в более мягкие температурные условия, могут погиб-

нуть и стать пищей для членов собственной колонии.

Удивительная адаптация к жаре позволяет этим муравьям выжить в суровой окружающей среде. Они не только питаются в то время, когда другие животные спят, но, выходя из нор в самый жаркий час суток, избегают своего главного врага — ящериц, начинающих искать убежище как раз в полдень.

Сходное термофильное поведение наблюдалось и у двух других родов пустынных муравьев — *Ocymyrmex* в Намибии и *Melophorus* в Австралии. «Они едят в любой настоящей пустыне мира, — говорит зоолог Р. Венер из Цюрихского университета, недавно опубликовавший в журнале «Nature» статью об этих насекомых. — Вот пример параллельной эволюции».

Все виды *Cataglyphis* необычны тем, что не оставляют пахучих меток. Большинство муравьев отмечает свой путь до источника пищи феромоновым следом. Затем они ориентируются по этому запаху, путешествуя между гнездом и кормом. В случае необ-

ходимости некоторые виды способны определять направление по поляризации света.

Большинство пустынных муравьев собирают пищу ночью и в относительно прохладное время дня. Но в самый пик жары, как поясняет Венер, использовать феромоны было бы бессмысленно. У этих веществ высокое давление паров и они бы быстро испарились, оставив муравьев без ориентиров. Кроме того, химические вещества пристаут к песчинкам, которые легко уносятся ветром. Считается, что термофильные муравьи вроде *C. bombycina* используют главным образом небесные ориентиры, в частности поляризацию света. «Все они индивидуалисты, — с некоторой гордостью отмечает Венер. — Они не ходят вереницей; их появление напоминает взрыв звезды».

То, что массовые выходы муравьев на поверхность стимулируются температурой, Венер открыл случайно. Обычно он и его коллеги, проводя в Сахаре долгий жаркий день за сбором муравьев и наблюдением их поведения, затем объезжали местность на машине, возвращая насекомых к их норам. («Мы были очень добры к ним», — замечает ученый.) Как-то вечером исследователи выпустили нескольких муравьев в один из ходов, и, по словам Венера, «неожиданно масса их появилась на поверхности».

Поскольку такое раньше наблюдалось только в полдень, Венер сделал вывод, что муравьев нагрело тепло автомобиля, а их повышенная температура стимулировала выход из норы других сборщиков корма. Однако эта активность длилась недолго: пробежав около 20 м, они вернулись назад.

Не обращая внимания на палящее солнце и песок, Венер упорно ведет наблюдения за своими муравьями: «Я буду заниматься этими созданиями до конца жизни. Они слишком очаровательны». *Маргерит Холлоуэй*



НЕКОТОРЫЕ ПУСТЫННЫЕ МУРАВЬИ собирают корм (в данном случае — сыр, предложенный исследователем) при температуре выше 45°C. (Фотография: Rüdiger Wehner.)



Биологические основы обучения и индивидуальности

Сделанные недавно открытия говорят о том, что в основе обучения лежит совокупность простых процессов, изменяющих силу связей между нейронами головного мозга. Эти изменения играют важную роль в формировании неповторимой человеческой индивидуальности

ЭРИК Р. КЭНДЕЛ, РОБЕРТ Д. ХОКИНС

В ПОСЛЕДНИЕ десятилетия происходило постепенное сближение двух поначалу отдельных областей знания: нейробиологии — науки о мозге, и когнитивной психологии — науки о разуме. Недавно это объединение ускорило, в результате чего возник новый концептуальный подход к изучению восприятия, речи, памяти и сознания. В основе нового подхода лежат открывшиеся возможности изучения биологического субстрата психических функций. Особенно впечатляет такой пример, как исследования обучения. Элементарные аспекты нейронных механизмов некоторых форм обучения сегодня можно изучать на клеточном и даже на молекулярном уровне. А стало быть, анализ обучения может позволить впервые проникнуть в тайны молекулярных механизмов психического процесса и таким образом перекинуть мостик между когнитивной психологией и молекулярной биологией.

Обучение — это процесс, при помощи которого индивид приобретает новые знания, а память — это процесс, позволяющий эти знания не терять со временем. Большая часть того, что человек знает о мире и цивилизациях, является результатом обучения, так что обучение и память играют центральную роль в формировании чувства индивидуальности. Но обучение фактически выходит за рамки индивида, обеспечивая передачу культуры из поколения в поколение. Обучение служит одним из главных инструментов поведенческой адаптации и мощной силой общественного прогресса. И наоборот, при потере памяти человек утрачивает связь с собственным «Я», своим прошлым и другими людьми.

Вплоть до середины XX в. большинство исследователей поведения не считали память особой независимой от движения, восприятия, внимания и речи психической функцией. И долгое время после того, как была установлена локализация этих функций в различных участках мозга,

ДВА РАЗЛИЧНЫХ ТИПА ОБУЧЕНИЯ были впервые замечены в 1960 г. в экспериментах, в которых больные с поврежденными височными долями рисовали с помощью зеркала. Одна форма обучения, на которой такие повреждения не отражаются, связана с выработкой автоматизмов, например двигательных навыков, как в этом эксперименте. Испытуемый, видящий свою руку только в зеркале, пытается обвести контур звезды. Вторая форма обучения, зависящая от сознания и когнитивных процессов, сильно страдает от повреждений височных долей.



бытовало мнение, что память вообще нельзя приурочить к какой-либо определенной мозговой структуре.

Первым, кто отвергнул эти представления, стал нейрохирург У. Пенфилд из Монреальского неврологического института. В 40-х годах Пенфилд применил электрическую стимуляцию для картирования моторных (двигательных), сенсорных (чувствительных) и речевых функций в коре мозга у больных эпилепсией, подвергавшихся нейрохирургическим операциям. Посколь-

ку в самом головном мозге болевых рецепторов нет, нейрохирургические операции можно проводить под местной анестезией — при этом пациент сохраняет полное сознание и может описать свои ощущения в ответ на раздражение разных участков коры электрическим током. Таким образом Пенфилд изучил корковую поверхность более чем у 1000 человек. Время от времени он замечал, что под влиянием электрической стимуляции возникает реакция ретроспекции («кадры» из прошлого), при которой пациент вспоминает и связно описывает какое-нибудь событие из своего прежнего опыта. Подобные реакции неизменно вызывала электрическая стимуляция височных долей мозга.

Участие височных долей в процессах памяти подтвердилось в 50-х годах при наблюдении нескольких больных эпилепсией, которым удалили с обеих сторон гиппокамп и соседние участки в височных долях. В первом и наиболее обстоятельном сообщении Б. Милнер из Монреальского неврологического института описала случай Х.М. — 27-летнего рабочего сборочного цеха, который более 10 лет страдал изнурительными не поддававшимися лечению судорогами с очагом в височных долях. Хирург У. Сквилл удалил ему медиальную часть височных долей обоих полушарий. Теперь судороги беспокоили больного гораздо меньше, но сразу же после операции обнаружились серьезные расстройства памяти: исчезла способность к долговременному запоминанию новой информации.

Несмотря на трудности, которые Х. М. испытывал при запоминании чего-то нового, информация, накопленная у него в долговременной памяти раньше, сохранилась. Он помнил свое имя, нормально пользовался речью со своим обычным словарным запасом, коэффициент интеллектуальности остался на прежнем уровне. Больной хорошо помнил события, предшествовавшие хирургическому вмешательству (например, чем он занимался на работе), и живо описывал эпизоды из своего детства. Более того, кратковременная память у него совершенно не пострадала. Но нарушилась — и очень значительно — способность переводить вновь полученную информацию из кратковременной

памяти в долговременную. Так, нормально общаясь с сотрудниками больницы, запомнить их Х. М. был не в состоянии, хотя и видел из дня в день.

Вначале предполагалось, что недостаточность памяти после двустороннего удаления участков височных долей одинаково влияет на все формы обучения новым навыкам. Однако Милнер вскоре установила, что дело обстоит не так. Хотя у больных с подобными повреждениями мозга отмечается глубокое расстройство памяти, с некоторыми типами заданий по обучению они справляются не хуже здоровых испытуемых и способны долгое время помнить их. Впервые Милнер продемонстрировала такую «остаточную» память у Х. М., обнаружив, что он способен нормально обучаться новым моторным навыкам (см. рисунок на с. 42). Она, а затем Э. Уоррингтон из Национальной неврологической больницы в Лондоне и Л. Вайскранц из Оксфордского университета показали также, что больные вроде Х. М. обладают способностью к элементарным формам обучения и запоминания, включающим изменение силы рефлекторных ответов (таким, как привыкание, сенситизация и образование классических условных рефлексов).

Стало очевидно, что различия между типами обучения, выявленные при изучении больных с повреждением височных долей, отражают некие фундаментальные психологические характеристики, касающиеся способа

приобретения знаний. Хотя пока не ясно, сколько существует разных систем памяти, специалисты единодушны в том, что повреждение височных долей мозга сильнее всего нарушает такие формы обучения и памяти, которые требуют сознательного процесса. Эти формы обучения по предложению Н. Коузна из Иллинойского университета, Л. Скуайра из Калифорнийского университета в Сандиего и Д. Шактера из Торонтского университета называют декларативными, или эксплицитными. Те же формы обучения, в которых сознание не участвует, у больных с поврежденными височными долями поразительно образом остаются ненарушенными; они называются процедурными, недеklarативными, или имплицитными.

Эксплицитное обучение происходит быстро, иногда после первого же «урока». Часто оно основано на ассоциации одновременно действующих раздражителей и позволяет хранить информацию о разовом событии, совершившемся в определенное время в определенном месте; следовательно, оно позволяет распознавать знакомые, случавшиеся прежде, и незнакомые события. Напротив, имплицитное обучение осуществляется медленно, его эффект накапливается по мере повторения «урока». Часто оно основано на ассоциации последовательно действующих раздражителей и позволяет хранить информацию о причинно-следственных отношениях между событиями. Имплицитное обучение

проявляется главным образом в улучшении выполнения определенных заданий, когда и сам испытуемый не может описать, чему он, собственно, научился; оно предполагает деятельность систем памяти, не касающихся содержания общего запаса знаний индивида. Когда пациентов вроде Х. М. спрашивают, почему они справляются с каким-нибудь заданием через 5 дней практики лучше, чем впервые, в ответ можно услышать: «О чем вы говорите? Никогда прежде я с таким заданием не сталкивался».

В то время как эксплицитная память у позвоночных связана со структурами височных долей, имплицитная предположительно опосредуется активацией тех специфических сенсорных и моторных систем, которые участвуют в выполнении данного задания при обучении; запечатление и хранение информации происходят за счет пластичности этих нейронных систем. Таким образом, имплицитную память можно изучать в различных рефлекторных системах как у позвоночных, так и у беспозвоночных. И действительно, даже сравнительно простые беспозвоночные животные проявляют прекрасные способности к рефлекторному обучению.

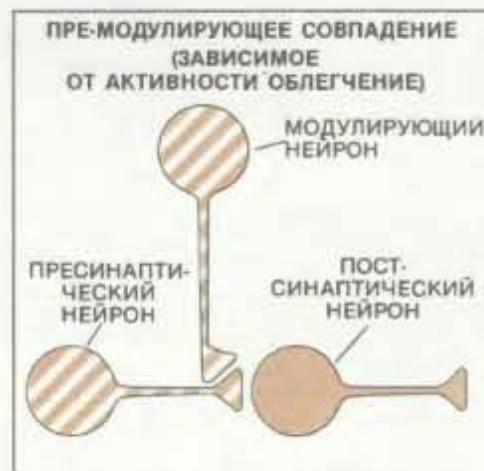
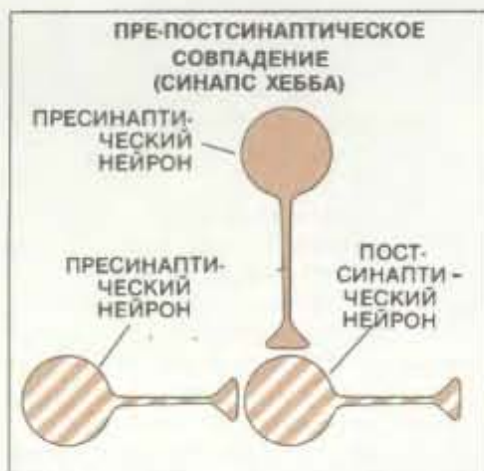
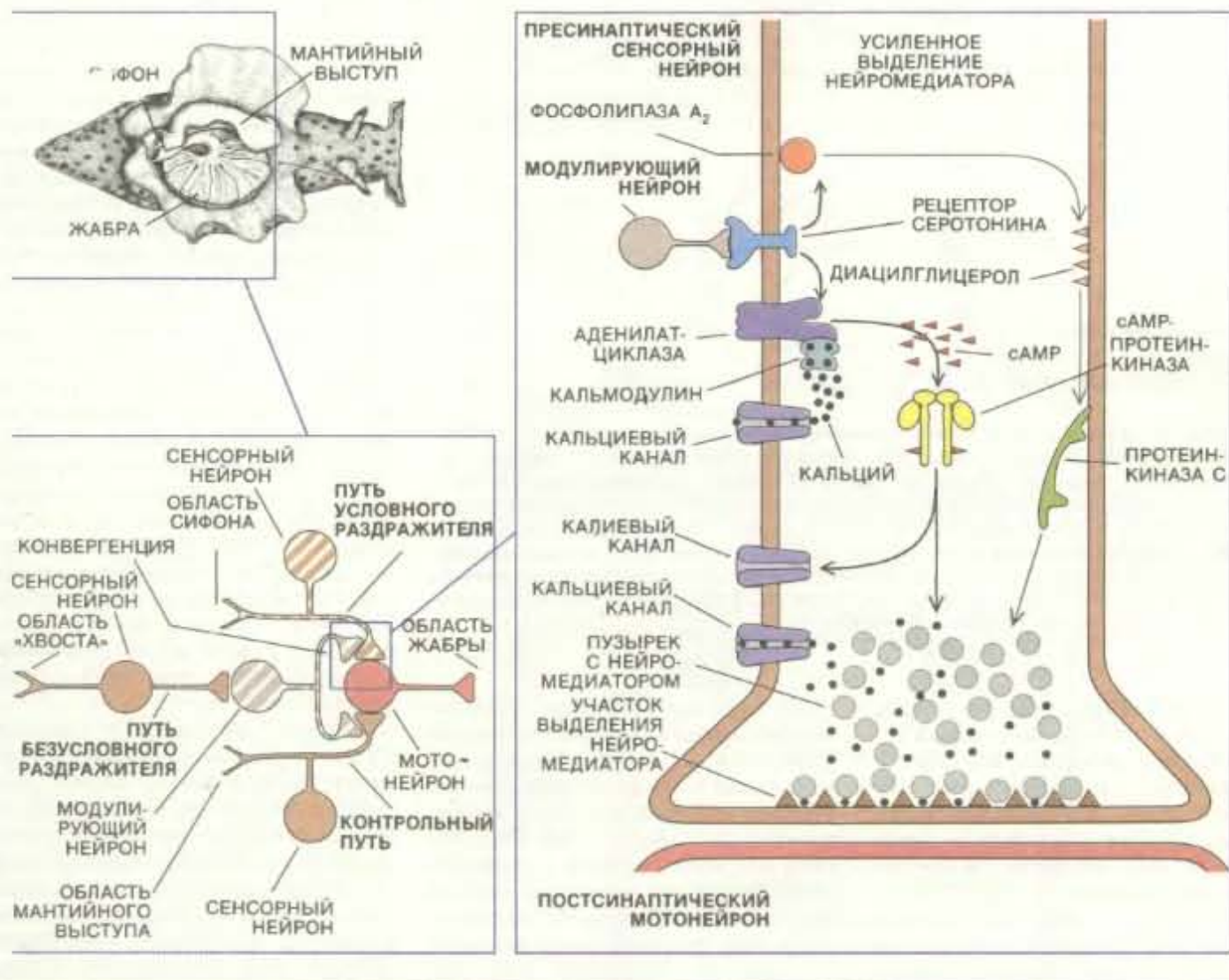
ФАКТ существования двух различных форм обучения побудил некоторых нейробиологов-редукционистов выяснить, представлены ли они на клеточном уровне. Нейронные системы, опосредующие как эксплицитную, так и имплицитную память, способны хранить информацию об ассоциации раздражителей. Но подчиняются ли эти две системы памяти при запоминании ассоциаций одним и тем же правилам клеточного обучения или же каждая из них управляется по своим принципам?

Вначале исследования нервной субстрата систем памяти базировались на предположении, что как имплицитная, так и эксплицитная ассоциативная память обеспечиваются сложными нейронными сетями. Одним из первых против этой точки зрения выступил канадский психолог Д. Хебб, ученицей которого была Милнер. Хебб высказал смелую гипотезу, согласно которой в основе ассоциативного обучения могут лежать простые клеточные механизмы. По мнению Хебба, ассоциации образуются в результате совпадения нейронной активности во времени: «Если аксон клетки А... возбуждает клетку В и многократно или постоянно вызывает ее импульсацию, в одной из этих клеток или в обеих начинаются некие процессы роста или метаболические изменения, которые приводят к уве-

Классические условные рефлексы у *Aplysia*

Улитка *Aplysia*, или морской заяц (вверху слева), используется для изучения биологического субстрата обучения из-за относительной простоты ее нервной системы, состоящей всего лишь из примерно 20 тыс. сравнительно крупных нейронов. На схеме (внизу слева) показан один из нервных путей, участвующий у *Aplysia* в классическом условном рефлексе втягивания жабры. Механизм, лежащий в основе обучения, заключается в усилении выделения нейромедиатора под влиянием зависящего от активности облеглачения. Справа показаны молекулярные этапы за-

висимого от активности облеглачения. Воздействие безусловного раздражителя приводит к выделению серотонина модулирующим нейроном. Этот нейромедиатор вызывает активацию аденилатциклазы в сенсорном нейроне. Когда последний находится в активном состоянии, в нем увеличивается уровень кальция. Кальций связывается с кальмодулином, а тот — с аденилатциклазой, усиливая ее способность синтезировать циклический аденозинмонофосфат (сАМР), который активирует протеинкиназу. В результате клетка выделяет гораздо больше нейромедиатора, чем обычно.



АССОЦИАТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ силы связи между нервными клетками (эффективности синапса) при обучении обеспечиваются, как предполагают, двумя клеточными механизмами. Предложенный в 1949 г. Д. Хеббом механизм пре-постинаптического совпадения основан на том, что для усиления связи между пресинаптическим и постсинаптическим нейронами необходимо совпадение их активности во времени. Суть механизма пре-модулирующего совпадения, сформулированного в 1963 г. в результате изучения нервной системы улитки *Aplysia*, заключается в том, что для усиления связи между двумя нейронами активность постсинаптической клетки не нужна, если одновременно с пресинаптической клеткой активен некий третий — модулирующий — нейрон. (Нейроны, совпадение активности которых необходимо для ассоциативного изменения, заштрихованы полосками.)

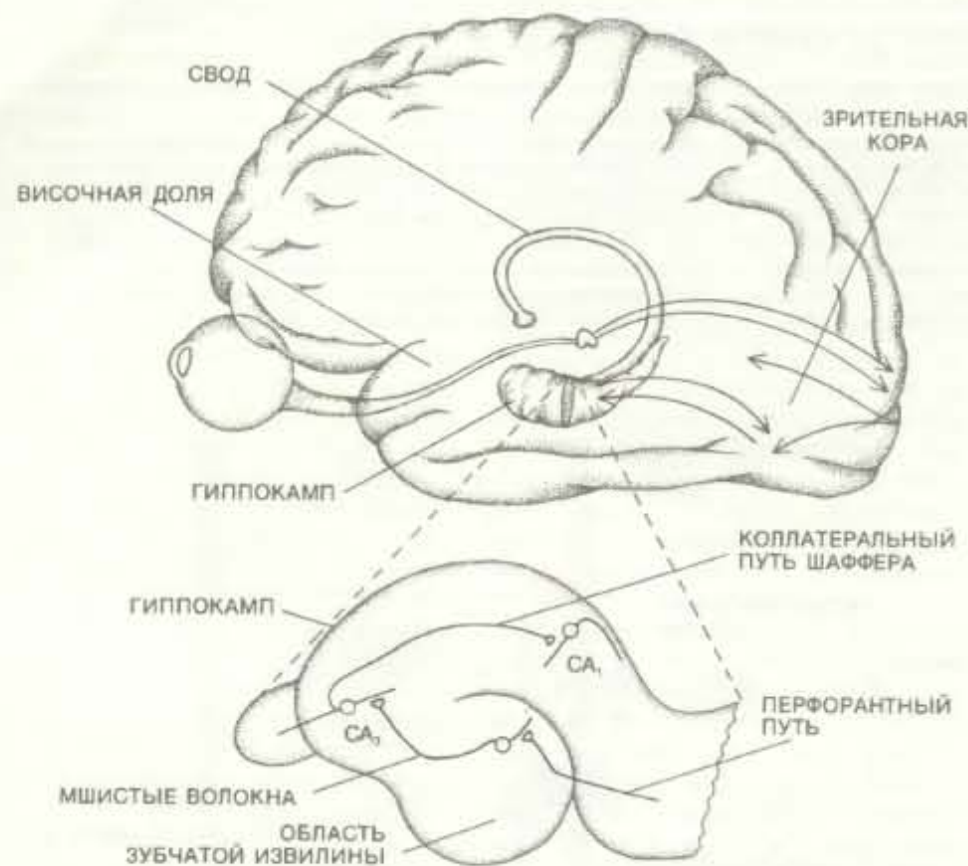
личению эффективности клетки А как возбудителя клетки В». По сформулированному Хеббом принципу обучения критическая роль в усилении связи между двумя нейронами, т. е. в повышении эффективности передачи сигнала через синапс, принадлежит совпадению активности пресинаптической и постсинаптической клеток во времени; этот ассоциативный механизм получил название пре-постинаптического (см. рисунок на с. 44).

В 1963 г. Л. Тауц и один из авторов этой статьи (Э. Кэндел), изучая в Институте им. Э.-Ж. Маре в Париже нервную систему морской улитки

Aplysia, сформулировали второй принцип ассоциативного обучения. Они обнаружили, что для усиления синаптической связи между двумя нейронами не требуется активности постсинаптической клетки, если на пресинаптическую клетку действует некий третий нейрон. Этот третий нейрон, названный модулирующим, повышает выделение нейромедиатора из терминалей (окончаний отростков) пресинаптического нейрона. Тауц и Кэндел предположили, что такой механизм может приобретать ассоциативность, если электрические импульсы, называемые потенциалами дейст-

вия, пресинаптической и модулирующей клеток совпадают (пре-модулирующий ассоциативный механизм).

Впоследствии мы и наши коллеги Т. Кэрю и Т. Эйбрамз из Колумбийского университета, а также Э. Уолтерз и Дж. Берн из Медицинского центра Техасского университета подтвердили это предположение экспериментально. Мы наблюдали пре-модулирующий ассоциативный механизм у *Aplysia*, у которой он участвует в одной из форм имплицитного обучения — выработке классического условного рефлекса. Затем в 1986 г. Х. Вигстрем и Б. Густафссон, работая



ГИППОКАМП хранит следы памяти временно, постепенно передавая их определенным участкам мозговой коры. Этот процесс иллюстрирован на рисунке запоминанием зрительного образа. Входные нервные сигналы направляются в зрительную кору, откуда информация поступает в гиппокамп, где хранится несколько недель, а потом передается обратно в кору для долговременной памяти. В гиппокампе (внизу) есть три главных синаптических пути, каждый из которых способен к долговременной потенциации, играющей, как считается, ключевую роль в процессе запоминания. Свойства долговременной потенциации в полях CA₁ и CA₃ гиппокампа различаются.

в Гётеборгском университете, установили, что пре-постсинаптический ассоциативный механизм действует в гиппокампе, где используется для разного рода синаптических перестроек, важных для одной из форм эксплицитного обучения, а именно пространственного.

Открытие двух различных принципов клеточного обучения, каждому из которых присуща ассоциативность, позволяло предположить, что ассоциативные механизмы имплицитного и эксплицитного обучения не нуждаются в сложных нейронных сетях. Способность детектировать ассоциации, возможно, просто отражает какое-то неотъемлемое свойство некоторых клеточных взаимодействий. Полученные данные, кроме того, затрагивают интересный вопрос: связаны ли как-нибудь между собой эти явно различные механизмы? Прежде чем коснуться их возможной взаимосвязи, рассмотрим оба механизма обучения подробнее, начав с пре-модулирующего механизма, участвующего в выработке классического условного рефлекса у *Aplysia*.

Классические условные рефлексы первым описал в начале XX в. русский физиолог И. П. Павлов, сразу же усмотревший в них простейшую форму обучения, благодаря которой ассоциируются два события. При классическом условном рефлексе исходно неэффективный раздражитель, называемый условным (точнее его следовало бы назвать раздражителем, который должен стать условным), повторно сочетается с высокоэффективным раздражителем, называемым безусловным. Вначале условный раздражитель вызывает лишь слабый ответ или вообще никакого; безусловный раздражитель провоцирует бурную реакцию без какого бы то ни было предварительного обучения.

В результате выработки условного рефлекса (обучения) условный раздражитель приобретает способность вызывать либо более сильный, либо новый ответ. Так, звонок (условный раздражитель) начинает эффективно провоцировать определенную реакцию (например, поднимание лапы) после того, как этот звук несколько раз сочетался с ударом по ноге (безус-

ловным раздражителем), неизменно вызывающим ее рефлекторное поднимание. Для того чтобы образовалась условная связь, т. е. произошло обучение, условный раздражитель, вообще говоря, должен коррелировать с безусловным, предшествуя ему на некоторый критический промежуток времени. Считается, что в результате животное обучается определять причинно-следственные отношения между двумя раздражителями.

Благодаря тому что центральная нервная система у *Aplysia* содержит всего-навсего около 20 тыс. нервных клеток, различные аспекты обучения можно изучать у нее на клеточном уровне. В поведенческий репертуар *Aplysia* входят несколько простых рефлексов, из которых лучше всего изучено рефлекторное втягивание жабры, служащей органом дыхания. Обычно животное втягивает жабру, когда раздражитель воздействует на противоположную часть тела (например, на мантийный выступ или мясистый отросток, называемый сифоном). И мантийный выступ, и сифон иннервируются собственными популяциями сенсорных нейронов. Каждая из этих популяций контактирует с мотонейронами (двигательными нервными клетками) жабры, а также с различными типами возбуждающих и тормозных интернейронов, образующих синапсы с мотонейронами. Мы с Кэрю и Уолтерсом обнаружили, что даже на базе такого простого рефлекса, как втягивание жабры, можно выработать условный рефлекс.

Слабое тактильное раздражение одного нервного пути, например обслуживающего сифон, можно сочетать с безусловным раздражением (сильным ударом электрическим током) «хвоста». Другой нервный путь, обслуживающий мантийный выступ, можно, таким образом, использовать в качестве контроля. Контрольный нервный путь раздражают столько же раз, но при этом раздражитель не сочетают (т. е. он не ассоциируется) с электрическим раздражением «хвоста». После пяти сочетаний ответ на раздражение сифона (нервного пути, подвергавшегося обучению) становится сильнее, чем ответ на раздражение мантии (нервного пути, не подвергавшегося обучению). Если процедуру изменить на обратную, т. е. в сочетании с ударом током вместо сифона раздражать мантию, ответ на раздражение мантийного выступа вскоре будет превосходить ответ на раздражение сифона. Такое дифференцированное обучение в некоторых аспектах удивительно похоже на то, что наблюдается у позвоночных.

Для выяснения механизмов образования условного рефлекса мы сосредоточили внимание на одном его компоненте, а именно на связях между сенсорными нейронами и клетками, служащими мишенью для их проекций — интернейронами и мотонейронами. Стимуляция сенсорных нейронов, связанных с сифоном либо с мантийным выступом, вызывает в интер- и мотонейронах возбуждающие синаптические потенциалы. Эти синаптические потенциалы заставляют мотонейроны генерировать разряды, что приводит к быстрому рефлекторному втягиванию жабры. Безусловное подкрепляющее раздражение «хвоста» активирует многие группы клеток, включая те, которые также вызывают движение жабры. В число таких клеток входят по меньшей мере три группы модулирующих нейронов, в одной из которых нейромедиатором служит серотонин. (Нейромедиаторы, которые опосредуют передачу сигналов между нервными клетками, называются первичными мессенджерами, т. е. первыми посланцами или посредниками; вторичными мессенджерами, или вторыми посланцами, являются химические агенты, опосредующие передачу информации внутри клетки.)

ют на сенсорные нейроны, связанные как с сифоном, так и с мантийным выступом, и вызывают здесь так называемое пресинаптическое облегчение, т. е. усиливают выделение нейромедиатора из терминалей сенсорных нейронов. Пресинаптическое облегчение составляет основу неассоциативной формы обучения, называемой сенситизацией, благодаря которой животное обучается увеличивать разнообразие своих защитных рефлекторных реакций в ответ на действие вредного раздражителя (см. статью: «Small Systems of Neurons» by Eric R. Kandel, "Scientific American", September, 1979). Обучение этого типа называют неассоциативным потому, что для него не нужно сочетания раздражителей.

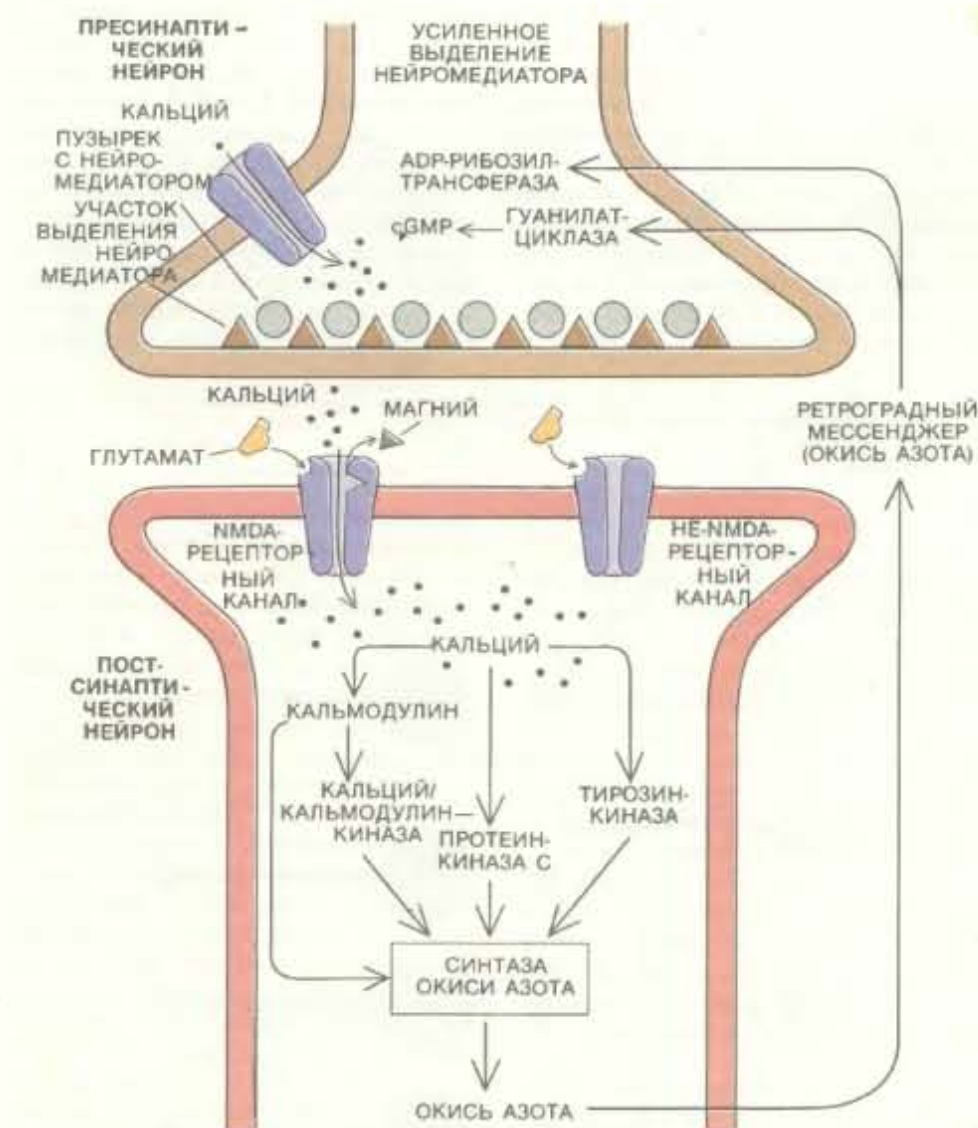
Тот факт, что модулирующие нейроны влияют на обе популяции сенсорных нейронов — как сифона, так и мантийного выступа, ставит интересный вопрос: каким образом достигается специфическое ассоциативное усиление нервных связей при классическом условном рефлексе? Оказалось, что важную роль здесь играет фактор времени. Чтобы произошло обучение, условный раздражитель, как правило, должен предшествовать безусловному на некоторый критический и зачастую очень малый промежуток времени. Для возникновения условного рефлекса втягивания жа-

бры при электрическом раздражении «хвоста» этот промежуток должен составлять около 0,5 с. Если время между действием условного и безусловного раздражителей длиннее либо короче или если их порядок обратный, обучение резко ухудшается, а то и вовсе не происходит.

Специфика временных характеристик условного рефлекса втягивания жабры отчасти определяется конвергенцией условного и безусловного раздражителей на отдельных сенсорных нейронах. Безусловный раздражитель представлен в сенсорных клетках влиянием модулирующих нейронов (особенно тех из них, в которых нейромедиатором служит серотонин). Условный раздражитель

представлен в сенсорных нейронах их собственной активностью. Мы обнаружили, что модулирующие нейроны, активированные безусловным раздражением «хвоста», вызывают большее пресинаптическое облегчение сенсорных нейронов, если сенсорные нейроны незадолго до этого генерировали потенциалы действия в ответ на условный раздражитель. Потенциалы действия, возникающие в сенсорных нейронах сразу после электрического раздражения «хвоста», такого эффекта не имеют.

Это свойство пресинаптического облегчения получило название зависимости от активности. Зависимое от активности облегчение на клеточном уровне требует тех же самых времен-



ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ПОТЕНЦИАЦИЯ сопровождается деполяризацией постсинаптической мембраны в результате активности не-NMDA-рецепторных каналов. Деполяризация снимает блокаду NMDA-каналов магнием, что позволяет кальцию поступать в клетку через эти каналы. Кальций активирует зависимые от него киназы, и это приводит к индукции долговременной потенциации. Постсинаптическая клетка, по-видимому, выделяет ретроградный мессенджер, способный проникать через мембрану пресинаптической клетки. Считается, что этот мессенджер, которым, возможно, служит окись азота, действует на пресинаптическую терминаль, усиливая выделение нейромедиатора глутамата путем активации гуанилатциклазы или АДФ-рибозилтрансферазы.

ных отношений, что и обучение — на поведенческом, и, возможно, лежит в основе последнего. Такие данные позволяют думать, что клеточным механизмом классического условного рефлекса втягивания жабры является совершенствование пресинаптического облегчения, т. е. механизм, действующий при сенситизации рефлекса. На основании результатов описанных выше экспериментов первоначально было сделано предположение, что существует некий клеточный «алфавит» обучения, посредством которого механизмы более сложных типов обучения получают в результате совершенствования или сочетания механизмов обучения более простых типов.

Следующим шагом на пути к разгадке того, каким образом формируются классические условные рефлексы, был бы ответ на вопрос: почему потенциалы действия, возникающие в сенсорных нейронах непосредственно перед безусловным раздражением «хвоста», увеличивают пресинаптическое облегчение? Ранее мы обнаружили, что серотонин, выделившийся из модулирующих нейронов в ответ на электрическую стимуляцию «хвоста», инициирует в сенсорных нейронах ряд биохимических сдвигов (см.

рисунок на стр. 45). Во-первых, серотонин, будучи первичным мессенджером, связывается с рецептором, активирующим фермент аденилатциклазу. Этот фермент превращает аденозинтрифосфат (АТФ; он служит в клетке универсальным источником энергии для биохимических процессов) в циклический аденозинмонофосфат (сАМР), который действует внутри клетки в качестве вторичного мессенджера, активируя протенинкиназу. Киназы — это ферменты, фосфорилирующие другие белки (т. е. присоединяющие к ним фосфатную группу), в результате чего активность тех увеличивается или уменьшается.

Активация протенинкиназы в сенсорных нейронах имеет несколько важных кратковременных последствий. Протенинкиназа фосфорилирует белки каналов в клеточной мембране, через которые транспортируются ионы калия (K^+). Фосфорилирование этих каналов (или белков, действующих на них) приводит к уменьшению калиевого компонента ионного тока, который обычно реполяризует потенциал действия. Уменьшение калиевого тока продлевает потенциал действия, обеспечивая тем самым большую продолжительность активного состояния кальциевых каналов, что позво-

ляет проникнуть в пресинаптическую терминаль большему количеству кальция. Кальций выполняет в клетке различные функции, в том числе участвует в высвобождении пузырьков с нейромедиатором из терминали. Когда в результате увеличения длительности потенциалов действия в терминаль проникает больше кальция, выделение из нее нейромедиатора увеличивается.

Во-вторых, серотонин, приводя к активации протенинкиназы, способствует мобилизации пузырьков с нейромедиатором из мест их резервных скоплений к тем участкам мембраны, где они изливают свое содержимое из клетки наружу; это облегчает выделение нейромедиатора, не зависящее от притока в клетку кальция. При этом сАМР действует параллельно с другим вторичным мессенджером — протенинкиназой С, которая тоже активируется под влиянием серотонина.

Почему при возникновении потенциалов действия в сенсорных нейронах непосредственно перед безусловным раздражением усиливается действие серотонина? Потенциалы действия вызывают в сенсорных нейронах ряд сдвигов. Они позволяют натрию и кальцию поступать в клетку, а калию — выходить из нее и изменяют мембранный потенциал нейрона. Эйбрамз и Кэдел обнаружили, что потенциалы действия имеют критическое значение для феномена зависимости от активности, в силу своего влияния на ток кальция внутрь сенсорных нейронов. Оказавшись в клетке, кальций связывает белок кальмодулин, который усиливает активацию аденилатциклазы под действием серотонина. Когда комплекс кальция с кальмодулином связывается с аденилатциклазой, усиливается образование сАМР. Это свойство аденилатциклазы заставляет рассматривать ее как важный пункт конвергенции сигналов об условном и безусловном раздражителях.

Таким образом, условный и безусловный раздражители представлены внутри клетки конвергенцией двух различных сигналов (кальция и серотонина) на одном и том же ферменте. Интервал в 0,5 с между двумя раздражителями, существенный для возникновения условного рефлекса втягивания жабры, возможно, соответствует времени, в течение которого в пресинаптической терминали происходит увеличение содержания кальция и его связывание с кальмодулином, в результате чего возрастает активность аденилатциклазы и увеличивается образование сАМР в ответ на действие серотонина.

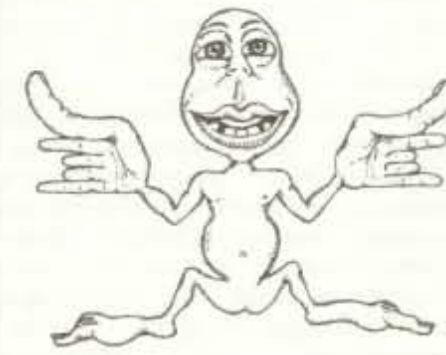
Феномен зависимой от активности

стимуляции пути с сАМР присущ не только рефлекторному втягиванию жабры и «хвоста» у *Aplysia*. Как показали генетические исследования, тот же молекулярный механизм свойствен классическому условному рефлексу у плодовой мушки *Drosophila*. Обнаружены моногенные мутанты, у которых обучение нарушено. Одного из таких мутантов, названного *rutabaga*, изучали У. Куин из Массачусетского технологического института и М. Ливингстон из Гарвардского университета, а также Я. Дудан из Вейцмановского института в Израиле. Теперь установлено, что дефектный ген у этого мутанта кодирует аденилатциклазу, зависящую от комплекса кальция с кальмодулином. В результате мутации *rutabaga* аденилатциклаза утратила способность активироваться комплексом кальция с кальмодулином. Как показал Р. Дейвис с сотрудниками в Колд-Спринг-Харборской лаборатории, данной формой аденилатциклазы у *Drosophila* богаты отделы мозга, называемые грибовидными телами, которые имеют критическое значение для некоторых типов ассоциативного обучения. Таким образом, исследования и на клеточном уровне (*Aplysia*), и на генетическом (*Drosophila*) указывают на огромную важность системы сАМР как вторичного мессенджера для некоторых простейших форм имплицитного обучения и памяти.

ПРЕДСТАВЛЕНА ли как-нибудь в нейронах ассоциативность более сложных эксплицитных форм обучения? Если да, то, должно быть, здесь иные механизмы, чем при имплицитном обучении, поскольку в отличие от классического условного рефлекса эксплицитное обучение часто более эффективно в тех случаях, когда два ассоциируемых события происходят одновременно. Так, лицо знакомого человека легко узнать, когда видишь его в каком-нибудь определенном контексте. Раздражители от лица и от окружающей обстановки действуют одновременно, что помогает его идентифицировать.

Как уже говорилось, для эксплицитного обучения у человека необходимо участие височных долей. Вначале было неясно, насколько обширным должно быть двустороннее повреждение височных долей, чтобы оно сказалось на хранении запомненной информации. Ответить на этот вопрос помогли исследования на людях и экспериментальных животных, проведенные М. Мишкином из Национальных институтов здоровья, а также Скуайром, Д. Эймаралом и С. Зола-Морганом из Калифорнийского уни-

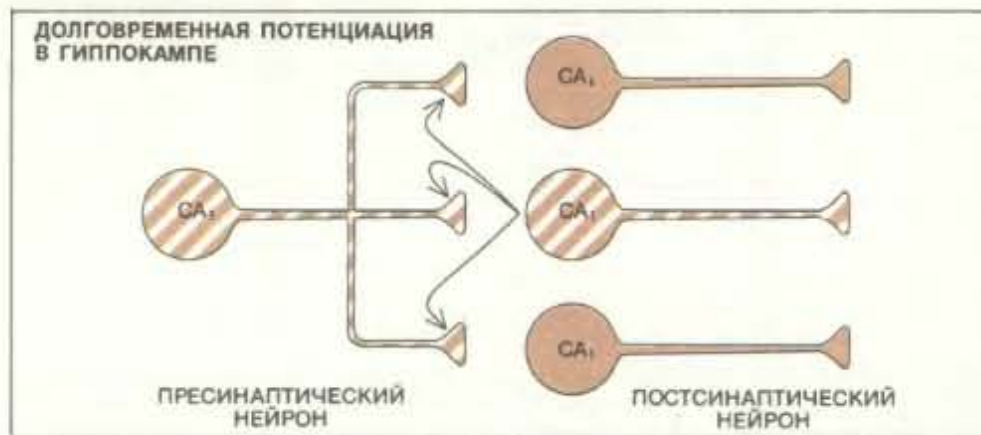
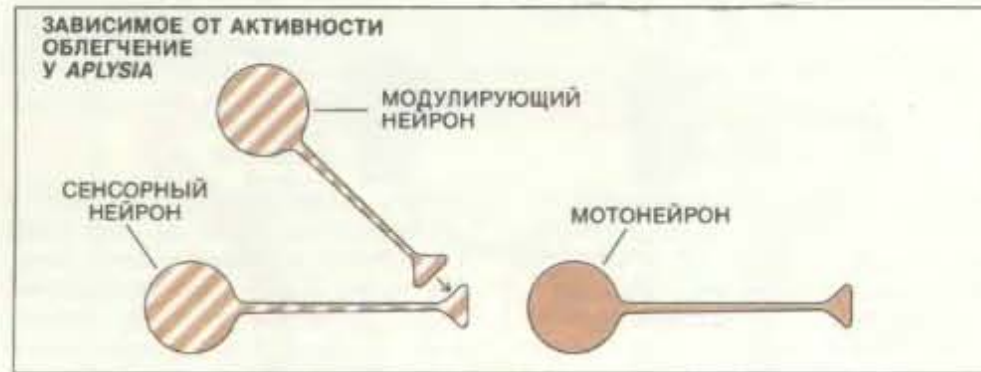
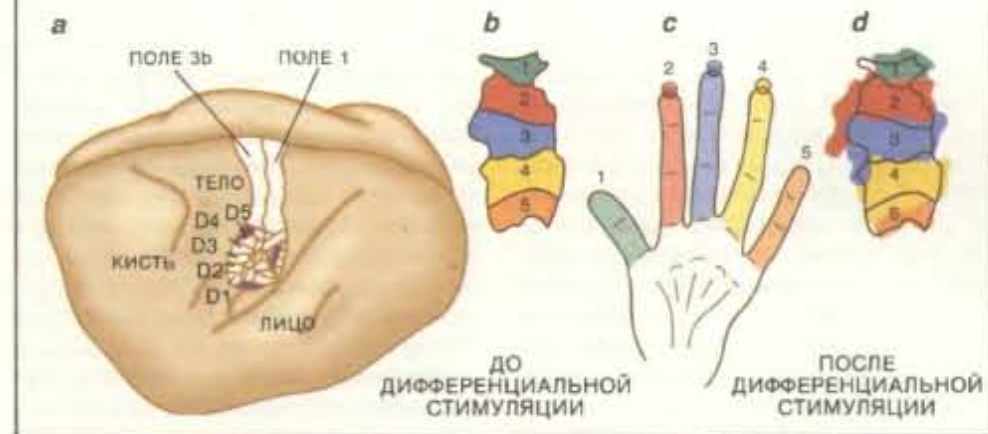
Представительство поверхности тела в коре



Такой гомункулус (лат. «человек») — традиционный способ изображения представленности поверхности тела в соматосенсорной коре. Частью тела с более высокой чувствительностью (например, пальцам и губам) отвечают более обширные области коры.

Недавно у обезьяны дурукули (*Aotes trivirgatus*) были продемонстрированы эффекты тренировки чувствительности. У этого животного пальцы представлены в полях 3b и 1 соматосенсорной коры (а). На схемах изображены участки карты поверхности коры, в которых у взрослой обезьяны

представлены пальцы (с) до (b) и после (d) тренировки. Обучение состояло в том, что обезьяна ежедневно в течение часа поворачивала диск, пользуясь вторым, третьим и время от времени четвертым пальцами руки. Через 3 месяца область представительства «тренированных» пальцев в мозговой коре значительно увеличилась.



АССОЦИАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, предположительно участвующие в обучении у *Aplysia* и у млекопитающих в гиппокампе, имеют, возможно, сходные механизмы. В обоих случаях может участвовать модулирующее вещество, вызывающее зависимость от активности усиление выделения нейромедиатора из пресинаптического нейрона. Чтобы произошло ассоциативное изменение, необходимо совпадение активности в определенных нейронах (заштрихованы полосками).

верситета в Сан-Диего. Они предположили, что одна из структур височной доли — гиппокамп — имеет особое значение для сохранения запомненного. Однако повреждение гиппокампа нарушает только образование новых следов памяти: такие больные, как Х. М., помнят прошлые события довольно хорошо. Повидимому, при долговременном запоминании гиппокамп служит лишь временным местом хранения информации. Он перерабатывает новую информацию, полученную в результате обучения, в течение недель или месяцев, а затем передает ее в соответствующие области коры большого мозга на более длительное хранение (см. статью Антониу Дамазу и Анны Дамазу «Мозг и речь» на с. 55). Как отмечает П. Гольдман-Ракич, следы памяти, хранящиеся в этих различных участках коры, впоследствии проявляются благодаря деятельности оперативной памяти префронтальной коры (см. ее статью «Оперативная память и разум» на с. 63).

В 1973 г. Т. Блисс и Т. Лемо, работая в лаборатории П. Андерсона в Осло (Норвегия), впервые показали, что нейроны гиппокампа обладают имен-

но такими пластическими способностями, которые требуются для обучения. Так, в одном из нервных путей в гиппокампе короткая высокочастотная серия потенциалов действия вызывает усиление синаптических связей этого пути. У анестезированного животного такое усиление может сохраняться часами, а у бодрствующего — сутками и даже неделями.

Блисс и Лемо назвали такое усиление синаптических связей долговременной потенцией. Впоследствии было установлено, что в разных гиппокампальных синапсах этот феномен имеет различные свойства. Мы остановимся здесь на потенции ассоциативного типа, отличающейся двумя взаимосвязанными характеристиками. Во-первых, в основе ее ассоциативности лежит пре-постсинаптический механизм обучения Хебба: для того чтобы произошло облегчение, требуется одновременная активация соответствующих пресинаптического и постсинаптического нейронов. И, во-вторых, поэтому долговременная потенция обнаруживает специфичность: она ограничивается только стимулируемым нервным путем.

Почему для долговременной потенциации необходима одновременная импульсация пресинаптической и постсинаптической клеток? В главных нервных путях гиппокампа медиатором служит глутаминовая кислота (глутамат). Глутамат вызывает долговременную потенциацию, связываясь со специфическими рецепторами на клетках-мишенях. Рецепторы глутамата бывают двух типов: NMDA-рецепторы (называемые так потому, что они связывают N-метил-D-аспартат) и не-NMDA-рецепторы. Синаптическую передачу опосредуют в основном эти последние, так как ионные каналы, связанные с NMDA-рецепторами, обычно заблокированы магнием. Их деблокирование в постсинаптическом нейроне происходит только при его деполяризации. Кроме того, для оптимальной активации NMDA-рецепторных каналов требуются одновременно два сигнала — связывание глутамата с его рецепторами и деполяризация постсинаптической клетки. Таким образом, NMDA-рецепторы по своим ассоциативным свойствам, т. е. способности к детекции совпадения событий, во многом похожи на аденилатциклазу. Однако по временным характеристикам, т. е. требованию одновременной активации, они лучше подходят для эксплицитного обучения, а не имплицитного.

Как впервые показали Г. Линч из Калифорнийского университета в Ирвине, а также Р. Николд и Р. Закер с коллегами в Калифорнийском университете в Сан-Франциско, для долговременной потенциации критически важно поступление кальция в постсинаптическую клетку через деблокированные ионные каналы, связанные с NMDA-рецепторами. Кальций инициирует долговременную потенциацию путем активации по меньшей мере трех разных типов протеинкиназ.

Индукция долговременной потенциации, по-видимому, зависит от постсинаптической деполяризации, вызывающей поступление кальция в клетку и последующую активацию киназ вторичных мессенджеров. А для ее поддержания требуется усиление выделения нейромедиатора из пресинаптической терминали, что было показано рядом исследователей, в том числе Блиссом с сотрудниками, Дж. Беккерзом и Ч. Стивензом из Солковского института, а также Р. Мейлиноу и Р. Ценом из Стэнфордского университета.

Если для индукции долговременной потенциации нужно постсинаптическое событие (поступление кальция в клетку через каналы, связанные с

NMDA-рецепторами), а для ее поддержания — пресинаптическое (усиление выделения нейромедиатора), то, как впервые предположил Блисс, от постсинаптического нейрона к пресинаптическому должен поступать какой-то сигнал — а это ставит перед нейробиологами трудную проблему. С тех пор как великий испанский физиолог С. Рамон-и-Кахаль сформулировал принцип динамической поляризации, все изучавшиеся химические синапсы оказывались односторонними: информация передается только в одном направлении, а именно от пресинаптической клетки к постсинаптической. Похоже, что в феномене долговременной потенциации мы сталкиваемся с иным принципом коммуникации нейронов. Не исключено, что активированные кальцием системы вторичных мессенджеров или, возможно, сам кальций непосредственно вызывают высвобождение из активной постсинаптической клетки некоего «ретроградного фактора пластичности». Этот фактор диффундирует к пресинаптической терминали и активирует в ней один или несколько вторичных мессенджеров, которые усиливают выход нейромедиатора и тем самым поддерживают долговременную потенциацию (см. рисунок на с. 47).

В отличие от пресинаптических терминалей, где нейромедиатор хранится в особых пузырьках и выделяется наружу через специализированные участки клеточной мембраны, постсинаптические терминали не имеют каких-либо специальных механизмов выделения веществ. А потому заманчиво было предположить, что ретроградный фактор представляет собой некое вещество, быстро диффундирующее из постсинаптической клетки через синаптическую щель в пресинаптическую терминаль. К 1991 г. четыре группы исследователей (Т. О'Делл и О. Арансо в нашей лаборатории, Э. Шуман и Д. Мадисон из Стэнфордского университета, П. Чалман и его коллеги из Медицинской школы Миннесотского университета, а также Г. Беме с сотрудниками во Франции) получили данные, свидетельствующие, что таким фактором может служить окись азота. Подавление синтеза окиси азота в постсинаптическом нейроне или ее поглощение из межклеточного пространства блокирует индукцию долговременной потенциации, а обработка окисью азота усиливает выделение нейромедиатора из пресинаптических нейронов.

Изучая эффекты воздействия окисью азота в срезах гиппокампа, С. Смолл, М. Чжо и я сделали удивительное открытие: окись азота вызы-

вает долговременную потенциацию только в том случае, если ее действие сочетается с активностью пресинаптических нейронов, что весьма напоминает феномен зависящего от активности пресинаптического облегчения у *Aplysia*. По-видимому, для того чтобы окись азота вызвала потенциацию, необходимы пресинаптическая активность и, возможно, поступление в клетку кальция. Эти данные позволяют предположить, что в основе долговременной потенциации лежит сочетание двух независимых синаптических механизмов ассоциативного обучения: механизма Хебба с участием NMDA-рецепторов и зависящего от активности пресинаптического облегчения, не подчиняющегося принципу Хебба. Согласно этой гипотезе, активация NMDA-рецепторов в постсинаптических клетках вызывает ретроградный сигнал (окись азота), который приводит в действие зависящий от активности пресинаптический механизм, облегчающий выделение нейромедиатора из пресинаптической терминали.

В чем могут заключаться функциональные преимущества такого сочетания двух ассоциативных клеточных механизмов обучения — постсинаптического NMDA-рецепторного механизма и зависящего от активности пресинаптического облегчения? Если пресинаптическое облегчение вызывается веществом, способным к диффузии, то теоретически это вещество могло бы достигать и соседних нервных путей. Действительно, как показывают исследования Т. Бонхеффера с сотрудниками из Института мозга им. Макса Планка во Франкфурте, долговременная потенциация, инициированная в какой-либо одной постсинаптической клетке, распространяется и на соседние постсинаптические клетки. Зависимость пресинаптического облегчения от активности могла бы обеспечивать потенциацию избирательную — только определенных, а именно активных пресинаптических путей. Неактивные же пресинаптические терминали в процесс не вовлекались бы (см. рисунок на с. 48).

Синаптические изменения, которые, как полагают, лежат в основе описанных форм имплицитного и эксплицитного обучения, создают любопытную возможность редукционистского толка. Тот факт, что для ассоциативных синаптических изменений нет нужды в сложных нейронных сетях, указывает на существование прямого соответствия между этими ассоциативными формами обучения и фундаментальными свойствами клеток. Из рассмотренных выше случаев явствует, что интересные нас

свойства клеток, по всей видимости, определяются свойствами специфических белков — аденилатциклазы и NMDA-рецептора, способных реагировать на два независимых сигнала (от условного и безусловного раздражителей). Разумеется, эти молекулярные ассоциативные механизмы действуют не изолированно. Они осуществляются в клетках, располагающих богатыми молекулярными приспособлениями для совершенствования ассоциативного процесса. Клетки же в свою очередь являются частью сложных нервных сетей со значительными избыточностью, параллелизмом и вычислительными возможностями, что придает этим элементарным механизмам существенную дополнительную сложность.

Открытие долговременной потенциации в такой мозговой структуре, как гиппокамп, известный своей причастностью к запоминанию информации, заставило задуматься над вопросом: участвует ли долговременная потенциация в процессах памяти в данной области мозга? Свидетельства в пользу утвердительного ответа на этот вопрос получил Р. Моррис и его сотрудники из Медицинской школы Эдинбургского университета с помощью специфического задания на пространственное запоминание. Когда у экспериментальных животных блокировали NMDA-рецепторы в гиппокампе, они теряли способность к пространственному обучению. Из этого можно сделать вывод, что NMDA-рецепторные механизмы гиппокампа и, вероятно, долговременная потенциация участвуют в пространственном обучении у животных.

РАССМОТРЕНИЕ возможных механизмов изменений в нервных клетках при обучении остается завершить обсуждением еще нескольких важных вопросов. Каким образом поддерживаются синаптические изменения, вызванные эксплицитным и имплицитным обучением? Как обеспечивается длительное сохранение памяти?

Эксперименты на животных — как *Aplysia*, так и млекопитающих — свидетельствуют о том, что сохранение результатов эксплицитного и имплицитного обучения осуществляется по стадиям. Первоначальное запоминание информации, представляющее собой форму кратковременной памяти, длится 'от нескольких минут до нескольких часов и сопровождается изменением силы предсуществующих синаптических связей (за счет описанных выше модификаций, опосредованных вторичными мессенджерами). Долговременные, т. е. длящиеся

неделями и месяцами, изменения хранятся там же, но для них требуются активация и экспрессия генов, синтез соответствующих белков и рост новых связей. К. Бейли, М. Чен и С. Шахер с сотрудниками из Колумбийского университета, а также Берн и его коллеги из Медицинского центра Техасского университета обнаружили, что у *Aplysia* образование долговременных следов памяти при сенситизации и классическом условном рефлексе сопровождается увеличением числа пресинаптических терминалей. Сходные анатомические изменения развиваются после долговременной потенциации в гиппокампе.

Если долговременная память вызывает анатомические сдвиги, не означает ли это, что всякое запоминание или забывание информации сопровождается изменением анатомии мозга? Изменится ли анатомически мозг, скажем, читателя от прочтения и запоминания данного номера «В мире науки»?

Ответить на этот вопрос пытались многие, но наиболее впечатляющих результатов добился, пожалуй, М. Мерзенич из Калифорнийского университета в Сан-Франциско. Он изучал представительство разных частей кисти руки в сенсорных областях мозговой коры. До недавних пор нейробиологи полагали, что это представительство в течение всей жизни индивида остается неизменным. Однако, как показал Мерзенич с сотрудниками, корковые карты подвергаются непрерывной модификации, зависящей от эксплуатации сенсорных путей. Поскольку разные люди воспитываются в несколько различных условиях, испытывают воздействие различных сочетаний раздражителей и, очевидно, по-разному применяют сенсорные и моторные навыки, архитектура мозга, должно быть, у каждого человека модифицируется по-своему. Такая дифференциальная модификация мозговой архитектуры в совокупности с неповторимым генетическим складом данного человека и

составляет биологическую основу индивидуальности.

Сказанное лучше всего подтверждается работой Мерзенича, в которой он обучал обезьяну дотрагиваться до вращающегося диска только тремя средними пальцами руки. После нескольких тысяч оборотов диска область представительства в коре этих пальцев расширилась за счет области, соответствующей остальным пальцам (см. рисунок на с. 49). Таким образом, упражнение может вызывать изменения коркового представительства наиболее деятельных пальцев. Каковы механизмы этих изменений? Как свидетельствуют полученные недавно данные, корковые связи в соматосенсорной системе непрерывно модифицируются и корректируются на основе скоррелированной активности с помощью механизма, подобного, по-видимому, тому, который вызывает долговременную потенциацию.

Собственно говоря, как отмечает К. Шатц (см. ее статью «Развивающийся мозг» на с. 23), результаты изучения развития мозга на клеточном уровне позволяют считать, что механизмы обучения дают мозгу некоторые дополнительные выгоды. Сегодня есть все основания думать, что для тонкой настройки межнейронных связей на поздних стадиях развития нужен зависящий от активности ассоциативный синаптический механизм наподобие долговременной потенциации. Если то же самое имеет место и на молекулярном уровне, т. е. если у обучения и у процессов развития и роста одинаковые молекулярные механизмы, то исследования обучения помогут поставить в более общее соответствие когнитивную психологию и молекулярную биологию. А эти широкие биологические представления снимут покров тайны с психических процессов и подведут под их изучение прочную базу эволюционной биологии.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

**Рой Ф. Швиттерс:
Разочарования
охотника за кварком**

Рой Ф. Швиттерс покачивается на краешке стула, пристально глядя на сенатора Дейла Бамперса от шт. Арканзас через зал, где проходят слушания конгресса США. Как директор проекта Сверхпроводящего суперкол-

лайдера SSC (Superconducting Super Collider) Швиттерс борется за его осуществление. Если строительство SSC будет завершено, то он станет самым мощным ускорителем частиц и самой дорогой научной установкой в мире. Но в середине июня 1992 г. палата представителей проголосовала за то, чтобы ликвидировать эту программу стоимостью 8,3 млрд. долл. Теперь



РОЙ Ф. ШВИТТЕРС борется с оппозицией в конгрессе по строительству суперколлайдера SSC под прерией Техаса. (Фотография: David Sams.)

Швиттерс должен попытаться убедить 51 сенатора в возобновлении финансирования проекта.

«Знаете ли Вы затраты на разработку дипольных магнитов?», — спрашивает Бамперс, говоря о магнитах, которые когда-нибудь, возможно, будут управлять движением элементарных частиц по 87-километровому круговому туннелю под прерией около Далласа.

«Приблизительно 150 тыс. долл. на каждый», — отвечает Швиттерс.

«По мнению д-ра Уильяма Харпера, — ворчит Бамперс, — стоимость сооружения магнитов будет в 2—4 раза больше вашей оценки».

«Это была первоначальная наметка, сэр, — восклицает Швиттерс голодом, полным гнева. — Она сделана до того, как у нас появилась возможность обсудить детали с экспертами, которые сейчас сооружают магниты». Источником полемики, Харпер, находится среди публики. Бамперс просит его подняться, и Харпер, несколько смущенный, признает, что теперь он согласен с цифрой 150 тыс. долл.

В течение трех часов Швиттерс отражает атаки Бамперса и защищает SSC перед комитетом из 9 сенаторов. Швиттерс сражается не в одиночку. Пять лауреатов Нобелевской премии присутствовали на слушании, чтобы своим авторитетом поддержать про-

ект. Позднее в этот же день Швиттерс встречается с президентом Джорджем Бушем, который обещает лично вмешаться. Однако в год выборов, когда общественность выражает недовольство правительственными расходами, сможет ли конгресс устоять перед символическим жестом ликвидировать свою самую дорогую научную программу?

Швиттерс, которому сейчас 48 лет, считает, что он обязан обеспечить плодотворное будущее для физики элементарных частиц путем завершения строительства гигантского ускорителя. В 70-е годы он был одним из исследователей, сыгравших ключевую роль в открытии, которое подтвердило существование элементарных частиц, называемых кварками. В 80-е годы, будучи профессором физики Гарвардского университета, он руководил сооружением первого детектора частиц на самом мощном ускорителе в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб). И если Швиттерс сумеет построить сверхпроводящий суперколлайдер, то именно он сможет руководить экспериментами, которые должны будут открыть фактор, обеспечивающий массу всех элементарных частиц.

Проехав полчаса по графству Эллис (шт. Техас) от штаб-квартиры SSC до лаборатории по испытанию магнитов, Швиттерс рад возможности сменить тему и поговорить о себе вместо того, чтобы обсуждать проект. Он вырос в Ситэле и, как многие дети космического века, научился получать удовольствие от запуска моделей ракет, строительства радиоприемников и экспериментирования с химическими наборами. «Мои родители очень поддерживали меня, — говорит он. — Я постоянно что-то взрывал».

Хотя его родители не получили высшего образования, они поддержали его поступление в Массачусетский технологический институт (МТИ). В первый раз он отправился к востоку от Миссисипи. В годы учебы Швиттерс получил «самую замечательную в мире работу летом» в качестве гида в Национальном парке Маунт-Райнир (шт. Вашингтон). Здесь он встретил Кэрен Кристал; они поженились, когда Швиттерс заканчивал предпоследний курс. Он остался в МТИ, чтобы получить степень доктора наук в области физики элементарных частиц и выполнить в Станфордском ускорительном центре (SLAC) эксперименты для своей диссертации. В 1971 г., когда Швиттерс закончил диссертацию, его жена родила первого из троих детей.

После защиты докторской диссертации Швиттерс пришел в SLAC как ученый, желающий продолжать ра-

ботать с этой «квалифицированной и имеющей высокий уровень мотивации группой». Под руководством Б. Рихтера Швиттерс вместе с М. Брейденбахом, Дж. Триллингом и Г. Гулдхабером начал строить комплексный детектор элементарных частиц для Станфордского позитрон-электронного аннигиляционного кольца SPEAR (Stanford Positron-Electron Asymmetric Rings). На коллайдере SPEAR электроны («вбивались» в позитроны — своих двойников из антивещества, и в этих столкновениях выделялась энергия до 4 млрд. электронвольт (4 ГэВ).

В начале 70-х годов физики как раз начали свыкаться с представлением о том, что все вещество состоит из кварков и лептонов. Эта теория полагала, что протон и нейтрон состоят из трех кварков каждый; электрон и позитрон относились к классу лептонов. Однако едва ли физики имели хотя бы отдаленное представление о том, что должно существовать несколько видов, или семейств, кварков и лептонов.

В 1973 г. специалисты группы, работающие на коллайдере SPEAR, заметили, что при энергии примерно 3,2 ГэВ результаты несколько необычны. Когда электроны и позитроны сталкивались при этой энергии, число регистрируемых «событий» было немного выше, чем их среднее число при других энергиях. В июне 1974 г. было решено по-другому оценить эти странные результаты. Первоначальный анализ не выявил ничего. Но через несколько недель стало ясно, что результаты искажались из-за неточности, допущенной в задании на составление программы для компьютера.

Однажды вечером в середине октября Швиттерс начал дома тщательно изучать результаты всей этой серии экспериментов, один за другим. Он нашел два, в которых число событий втрое превышало среднюю величину. «Я подумал, что это великолепно, — усмехается Швиттерс. — Я нашел плохие данные и все, что нам необходимо сделать, — это найти основание для их исключения». 22 октября он и его коллеги начали скрупулезный анализ двух «плохих» наборов данных. Они предположили, что несовпадения могли быть результатом неправильного срабатывания компонента детектора или другой ошибки компьютера.

Затем, днем 5 ноября, на остановке автобуса на Швиттерса «буквально нашло одно из тех озарений, о которых рассказывают те, кто работает в науке». «Я понял, что в этих экспериментах не было ничего ошибочного» — вспоминает он. На самом деле мо-

гла быть открыта новая элементарная частица.

Поскольку данные были предварительные, необходимо было провести другую серию измерений. Однако коллайдер SPEAR был усовершенствован, чтобы при столкновениях достигалась энергия 5 ГэВ, поэтому не так просто было вернуть установку назад к энергии 3,2 ГэВ. «Некоторые из нас сражались как сумасшедшие за то, чтобы вернуться назад и проверить», — говорит Швиттерс. Рихтер с неохотой решил, что группа может провести уик-энд за проверкой другой версии.

К воскресенью 10 ноября они получили при энергии 3,105 ГэВ в 100 раз больше событий по сравнению с обычной величиной. Наблюдался характерный признак нового типа кварка, называемого «очарованным» (с-кварк). Более важно то, что существование «очарованного» кварка не оставляло сомнений в теории кварков. «Нет необходимости говорить, что это был самый важный момент в моей научной карьере», — заявляет Швиттерс.

В своем открытии группа SPEAR была не одинока. Используя синхротрон с переменным градиентом в Брукхейвенской национальной лаборатории как ускоритель элементарных частиц, С. Чао Чун Тин и его сотрудники также обнаружили свидетельства существования «очарованного» кварка. 11 ноября обе группы объявили об открытии новой элементарной частицы при энергии 3,105 ГэВ. У Тина были хорошие данные уже в конце октября, но не было уверенности, чтобы обнародовать свои результаты.

В течение следующего года циркулировали слухи, что группа SLAC узнала о работе Тина до 11 ноября. Но в 1976 г. Шведская академия наук в основном уладила спорный вопрос о приоритете, присудив как Рихтеру, так и Тину Нобелевскую премию за открытие «очарованного» кварка. С тех пор физики пришли к заключению, что существуют кварки шести различных «ароматов»: «верхний» (*u*), «нижний» (*d*), «странный» (*s*), «очарованный» (*c*), «прелестный» (*b*) и «истинный» (*t*); все они открыты, за исключением *t*-кварка.

В 1979 г. воодушевленный перспективой преподавания и проживания в Бостоне, Швиттерс принял предложение стать профессором физического факультета Гарвардского университета. Он объединил свои усилия с Э. В. Толлестрапом, чтобы возглавить интернациональную группу из 200 ученых, проектировавших и создававших детектор для коллайдера CDF в Фермилаб (Collider Detector at

Fermilab). Детектор весил 4500 т и мог регистрировать более 100 тыс. столкновений элементарных частиц в секунду. В течение десятилетия CDF был основной экспериментальной установкой, позволявшей ученым проникнуть в суть таких проблем, как размер кварков, природа слабых и электромагнитных взаимодействий и свойства *t*-кварка.

Все это время одной из целей Швиттерса был неуловимый *t*-кварк. Он надеялся зарегистрировать его в SLAC, ожидал увидеть его в Фермилаб. Не судьба. Не удивительно, что он связал свои надежды с SSC с тех пор, как был привлечен к этому проекту в 1986 г.

Тем временем М. Тайгнер из Корнелльского университета отвечал за первоначальную разработку конструкции коллайдера. Как теперь полагают, основные узлы коллайдера будут установлены в длинном круговом туннеле, расположенном на глубине 50 м под равнинами графства Эллис. SSC спроектирован для того, чтобы ускорять два пучка протонов в противоположных направлениях и направлять их в центр одного из двух огромных детекторов. При столкновении одного протона с другим должна высвободиться энергия 40 триллионов электронвольт (40 ТэВ); эта величина превосходит энергию существующих ускорителей в 20 раз.

Швиттерс стал директором лаборатории SSC в январе 1989 г., в то время, когда адмирал Дж. Уоткинз был утвержден министром энергетики. Как глава органа, обеспечивающего выделение федеральных средств на программы строительства и эксплуатации ускорителей в США, Уоткинз заявил сенаторам, что он не утвердит план строительства SSC, «если его стоимость хотя бы на пенин превысит сумму 5,9 млрд. долл.». В том году конгресс выделил 225 млн. долл. на то, чтобы начать проект.

Однако в 1990 г., когда лаборатория начала заключительный этап проектно-конструкторских работ, стало ясно, что SSC не сможет быть построен за 5,9 млрд. долл., как представлялось первоначально. К настоящему времени лаборатория Швиттерса истратила более 1 млрд. долл. из федеральных средств и средств штата на то, чтобы разработать магниты и начать строительство. «Нам надо было провести критический анализ своих действий и намерений, — объясняет Швиттерс. — Должны ли мы ограничить сферу научной деятельности или просить у правительства еще немного денег? Это было очень трудное время».

Физики, изучающие элементарные частицы, решительно возражали про-

тив того, чтобы уменьшить необходимое для SSC энерго. Если это будет величина менее 40 ТэВ, то маловероятно, что будет достигнута научная цель проекта: открытие первопричины массы. Теоретики вычислили, что протонный коллайдер при энергии 40 ТэВ позволит получить данные об элементарной частице, известной как бозон Хиггса, или обнаружить более сложный механизм, который объясняет массу всех элементарных частиц. «Общее мнение таково, чтобы заниматься наукой и построить работающую установку», — заявляет Швиттерс.

В 1991 г. конгресс отнесся к этому доводу благожелательно и согласился с тем обстоятельством, что коллайдер может стоить 8,3 млрд. долл. Но щедрость законодателей, по-видимому, не распространяется на 1992 г. Если SSC переживет нынешний кризис с выделением средств, то заботы Швиттерса еще далеко не кончатся. Во-первых, его группа должна провести заключительные испытания прототинов магнитов прежде, чем начнется их серийное производство. Во-вторых, лаборатория рассчитывает на то, что взносы иностранных государств составят почти 1,5 из 8,3 млрд. долл., однако интенсивные переговоры, особенно с японцами, пока не привели к достижению каких-либо обязательств со стороны партнеров.

Швиттерс должен создать обстановку для проведения исследований на переднем крае науки и в то же время руководить грандиозным проектом по сооружению коллайдера. «Инициатива в проведении исследований должна исходить от самых молодых специалистов лабораторий, у которых, возможно, имеются лучшие новые идеи, — поясняет он. — Мы должны обеспечить такую возможность в рамках основного проекта по сооружению коллайдера, при которой ответственность снизу доверху за расхождение всех денег налогоплательщиков была бы ясна всем».

В течение всех политических споров Швиттерс старается заставить свой персонал сосредоточить внимание и усилия на событиях, происходящих в графстве Эллис, а не на Капитолийском холме. Однако мысль о закрытии лаборатории беспокоит людей. «Пять лет назад мы убедили правительство идти вперед, — вздыхает Швиттерс. — Потрачена уйма денег. Люди уехали из своих фирм. И сказать: "Извините, мы на самом деле не это имели в виду", будет чрезвычайно обидно». Швиттерс вынужден высказываться именно так из-за своего затруднительного положения в Вашингтоне.



Мозг и речь

Крупный комплекс нервных структур служит для представления в мозге понятий; комплекс меньшего размера формирует слова и предложения. Между двумя этими уровнями находится важный уровень, играющий роль посредника

АНТОНИУ Р. ДАМАЗИУ, АННА ДАМАЗИУ

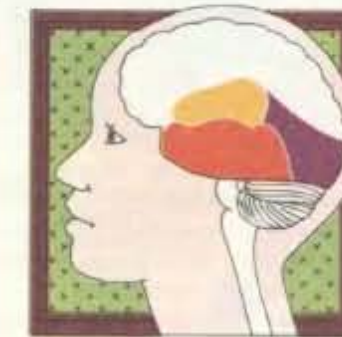
ЧТО ИМЕЮТ в виду нейробиологи, когда говорят о человеческой речи? По-видимому, способность человека использовать слова (у глухонемых знаки) и складывать из них фразы, чтобы передать другим понятия, существующие у говорящего в мозгу. Это также обратный процесс, т. е. понимание человеком слов, произнесенных другими, и превращение этих слов в понятия его собственного мышления.

Речь возникла и сохраняется постольку, поскольку служит чрезвычайно эффективным средством общения, особенно — передачи абстрактных понятий. Попробуйте сообщить о становлении и развале социалистического лагеря, не употребляя ни единого слова. Однако речь служит и для того, что П. Черчланд из Калифорнийского университета в Сан-Диего остроумно называет «когнитивным сжатием». Она помогает расчлнить окружающий мир и снижать сложность понятийных структур до масштабов, позволяющих ими манипулировать.

Например, слово «отвертка» включает в себя самые различные представления об этом инструменте, в том числе визуальное описание производимых им операций, его предназначение, специфику ситуаций, в которых он используется, ощущение инструмента в руке или связанные с ним движения. Или, скажем, существует огромное разнообразие понятий, представляемых одним словом «демократия». Мыслительная экономичность языка, легкость сведения с его помощью множества понятий в одном символе позволяют людям формировать все более сложные представления и, пользуясь ими, мыслить на таких уровнях абстрагирования, которые иначе были бы недостижимы.

Однако сначала слов не было. Речь появилась в ходе эволюции и, вероятно, лишь после того, как люди и их предки стали способны заранее представлять и различать свои действия, создавать и классифицировать мысленные представления о предметах, событиях и связях. Аналогичным образом младенец, точнее, его мозг занимается выработкой понятий и планированием мириад действий до того, как произнесет первое правильно выбранное слово и

МАРТИН ЛЮТЕР КИНГ остался в людской памяти и как проповедник мечты о расовой гармонии, и как оратор, способный находить слова, побуждающие слушателей к действию. Центральная проблема нейрофизиологии речи, по словам авторов, — картирование тех структур головного мозга, которые оперируют понятиями, и тех, что превращают понятия в слова.



гораздо раньше, чем научится составлять из слов предложения и свободно владеть речью. Однако созревание речевых процессов не всегда идет параллельно формированию понятий. Например, некоторые дети с дефектами понятийных систем тем не менее научаются грамоте. По-видимому, нервные механизмы, необходимые для определенных синтаксических операций, способны развиваться автономно.

Речь существует одновременно как артефакт во внешнем мире, т. е. как набор сим-

волов в их допустимых сочетаниях, и как отражение в мозге этих же символов и правил, определяющих их сочетаемость. Мозг использует для представления речи те же механизмы, что и для представления любого другого объекта. Поняв нервные основы представления мозгом внешних предметов, событий и их связей, нейробиологи одновременно поймут, как представлена в нем речь и каким образом она связана с образным мышлением.

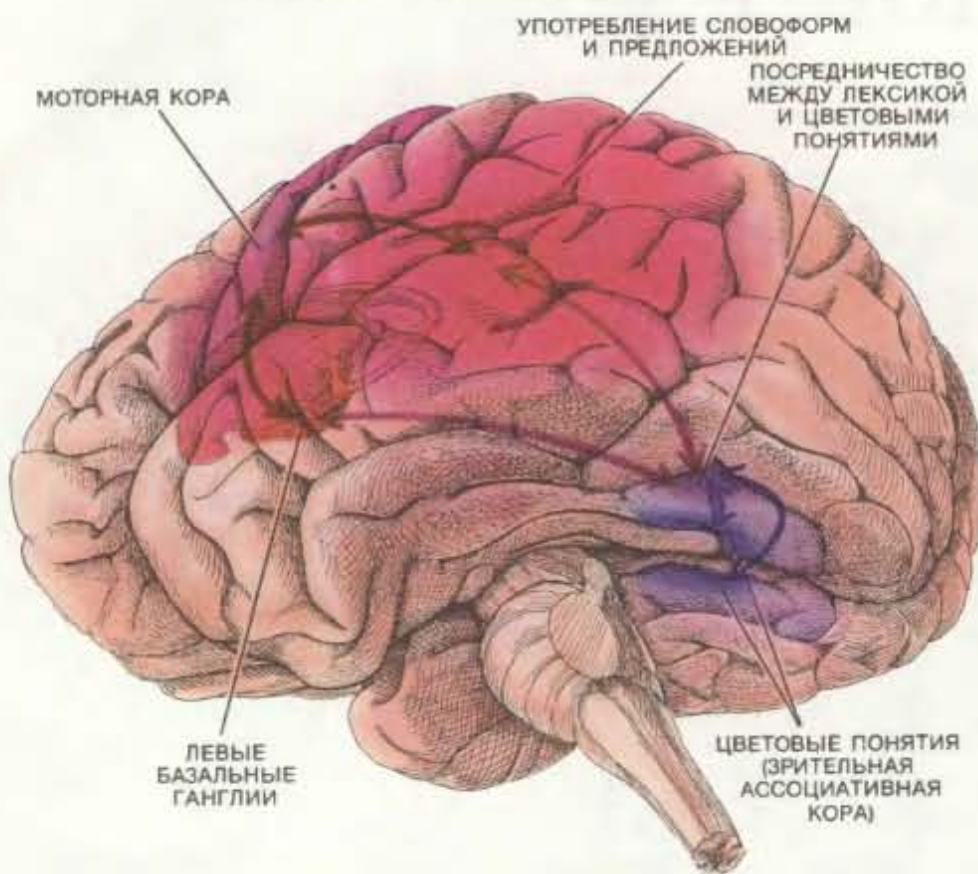
Мы полагаем, что мозг «владеет» речью с помощью трех взаимосвязанных комплексов структур. Во-первых, это множество нейронов и в правом, и в левом полушариях, которое соответствует представлениям о неречевых взаимодействиях между телом и его окружением, опосредованных различными сенсорными и двигательными системами, т. е. отражающее все, что человек делает, воспринимает, думает и чувствует, действуя в мире.

Мозг не только классифицирует эти образы (например, по форме, цвету, последовательности и эмоциональной окраске), но и создает следующий уровень представления для результатов этой классификации. Так люди организуют предметы, события и взаимосвязи. Последовательные уровни категорий и символических представлений создают основу для абстракции и метафор.

Во-вторых, несколько меньшее число нейронных систем, локализованных главным образом в левом полушарии, представляет фонемы, их сочетания и синтаксические правила комбинирования слов. При стимуляции «изнутри» мозга эти системы собирают словоформы в предложения, которые человек произносит или пишет. При внешней стимуляции речью или текстом они производят первоначальную обработку зрительных или слуховых речевых сигналов.

Третий комплекс структур, также находящийся в основном в левом полушарии, служит как бы посредником между двумя первыми. Он может на основе понятий стимулировать образование словоформ или же, воспринимая слова, заставлять мозг воспроизводить соответствующие понятия.

Гипотезы о таких посреднических структурах выдвига-



МОЗГОВЫЕ СИСТЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С АНАЛИЗОМ ЦВЕТА, дают пример организации речевых структур. Результаты изучения людей со стойкими поражениями головного мозга показывают, что понятия о цветах зависят от функционирования одной системы, слова, выражающие эти понятия, — от другой, а связь между понятиями и словами — от третьей.

лись и из чисто психолингвистических соображений. У. Левелт из Института психолингвистики им. Макса Планка в Неймегене предположил, что словоформы и фразы генериру-

ются из понятий с помощью компонента, который он назвал «леммой». М. Гаррет из Аризонского университета придерживается близкой точки зрения.

Элементы звуковой речи

ФОНЕМЫ	Индивидуальные звуковые единицы, соединение которых в определенном порядке образует морфемы.
МОРФЕМЫ	Наименьшие значимые единицы слов, сочетание которых образует слово. (В знаковых языках эквивалент морфемы — визуомоторный знак.)
СИНТАКСИС	Допустимые сочетания слов в предложениях (обычно называется грамматикой).
ЛЕКСИКА	Совокупность всех слов данного языка. Каждая лексическая единица содержит всю информацию о морфологических и синтаксических вариантах словоупотребления, но не включает понятийного знания.
СЕМАНТИКА	Значения, соответствующие всем лексическим единицам и всем возможным предложениям.
ПРОСОДИЯ	Голосовая интонация, которая может изменять буквальный смысл слов и предложений.
РЕЧЬ	Связь предложений таким образом, что они образуют повествование.

Хорошим примером такой трехуровневой организации служат понятия и слова, относящиеся к цветам спектра. Даже люди с врожденной цветовой слепотой знают, что определенные диапазоны оттенков образуют нечто связанное и отличаются от других независимо от их яркости или насыщенности. Как показали Б. Берлин и Э. Рош из Калифорнийского университета в Беркли, это понимание цветов имеет практически всеобщий характер и возникает, даже если в данной культуре нет названий для соответствующих оттенков. Естественно, сетчатка и наружное колбочковое тело проводят первоначальную обработку цветовых сигналов, однако первичная зрительная кора и по крайней мере еще две корковые области (называемые V2 и V4) также в ней участвуют: они генерируют, так сказать, ощущение цвета.

Вместе с моим коллегой М. Ришо мы обнаружили, что поражение затылочной и подзатылочной частей правой и левой язычных извилин, где, как считается, находятся корковые зоны V2 и V4, приводит к состоянию, называемому ахроматопсией. Больные, прежде нормально воспринимавшие цвета, этой способности лишаются (см. статью Семира Зеки «Зрительный образ в сознании и в мозге» на с. 33). Более того, они утрачивают даже возможность представлять их себе. Люди с ахроматопсией обычно видят мир в оттенках серого. Пытаясь вызвать у себя в мыслях цветной образ, они видят форму, движение и текстуру, но не цвет. Когда они думают о траве, она для них не зеленая, так же как, скажем, кровь не красная, а банан не желтый. Ни в каком другом участке мозга повреждения не приводят к такому результату. Значит, в определенном смысле понятие цвета зависит от этой области.

Больные с поражениями левых задневисочной или нижнетеменной зон коры не теряют доступа к понятиям, но их способность правильно строить слова независимо от того, к чему они относятся, сильно страдает. Даже если они верно ощущают данный цвет и пытаются подобрать соответствующую словоформу, нужное название фонемически искажается; произносится, например, «губой», а не «голубой».

Другие больные — с поражением височной части левой язычной борозды — страдают особым дефектом — цветовой аномией, — при котором не затрагиваются ни понятия цветов, ни соответствующие им слова. Эти люди продолжают ощущать цвета нормально: они могут сопоставлять различные тона, различать их по насы-

щенности и легко подбирать нужный цветной квадратик для предметов, изображенных на черно-белой фотографии. Однако их способность правильно называть цвета сильно страдает. Можно только поражаться, видя, как больные говорят «синий» или «красный», когда им показывают зеленый или желтый предмет, и при этом безошибочно кладут зеленый квадратик рядом с рисунком лука и желтый — рядом с изображением банана. Это нарушение «двустороннее»: слыша название цвета, человек показывает не на тот рисунок.

В то же время все неправильные названия нормально произносятся фонетически и других речевых расстройств у больных не наблюдается. Системы понятий, связанные с цветом, и употребления словоформ не затронуты. По-видимому, в данном случае поражен нервный механизм, служащий между ними посредником.

ТАКАЯ трехуровневая организация, объясняющая связь речи с цветами спектра, применима и ко всем прочим группам понятий. Но как сами понятия физически представлены в мозге? По нашему мнению, устойчивых «изобразительных» представлений предметов или людей, как предполагалось традиционно, там не существует. Вместо этого мозг сохраняет запись нервной активности, имевшей место в сенсорной и двигательной коре при взаимодействии с данным объектом. Эти записи — системы синаптических связей, которые способны воспроизвести определенные картины активности, соответствующие предмету или событию; каждая запись может также стимулировать связанные с ней записи. Например, когда человек берет чашку с кофе, его зрительная кора реагирует на цвета чашки и ее содержимого, ее форму и положение в пространстве. Соматосенсорная кора регистрирует форму, принимаемую ладонью, когда та охватывает чашку, движение руки, подносящей чашку к губам, тепло кофе и приятные изменения в теле, которые чувствуют некоторые люди от этого напитка. Мозг не только отражает детали окружающего мира, но и записывает, как организм использует среду и на нее реагирует.

Нервные процессы, описывающие взаимодействие между индивидом и объектом, представляют собой быструю последовательность микровосприятий и микрореакций, происходящих на уровне сознания почти одновременно. Они протекают в отдаленных друг от друга функциональных областях, каждая из которых подразделена на более мелкие зоны. Напри-

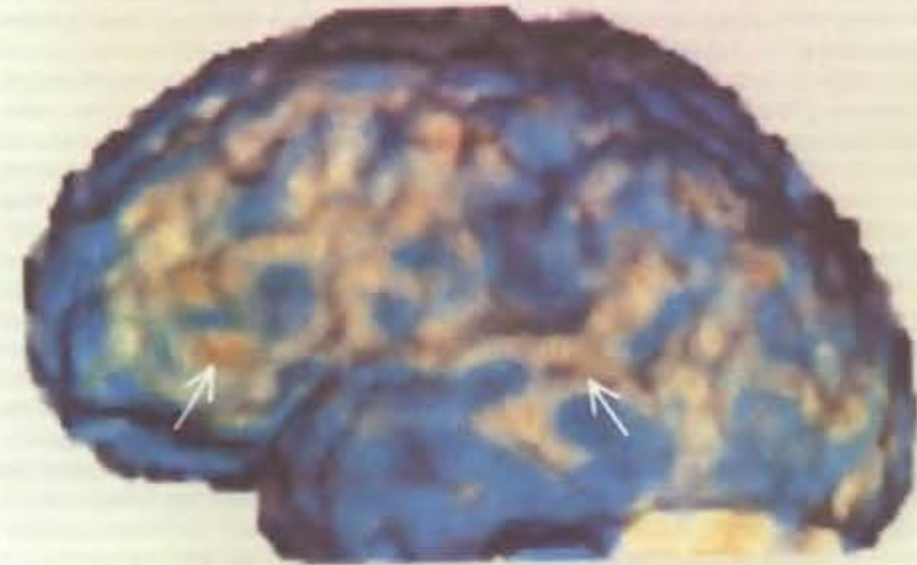
мер, зрительный аспект восприятия включает подсистемы, специализированные на цвете, форме и движении.

Где же могут находиться «записи», связывающие в единое целое все эти разобщенные активности? По нашему мнению, в комплексах нейронов внутри многочисленных мозговых областей «конвергенции». В этих местах аксоны нейронов «прямой связи» из одних участков мозга сходятся и соединяются с расходящимися путями «обратной связи» от других его участков. Когда реактивация в зонах конвергенции стимулирует эти обратные связи, множество анатомически разделенных и широко распределенных по мозгу нейронных комплексов начинают работать одновременно и восстанавливают существовавшие прежде картины мыслительной активности.

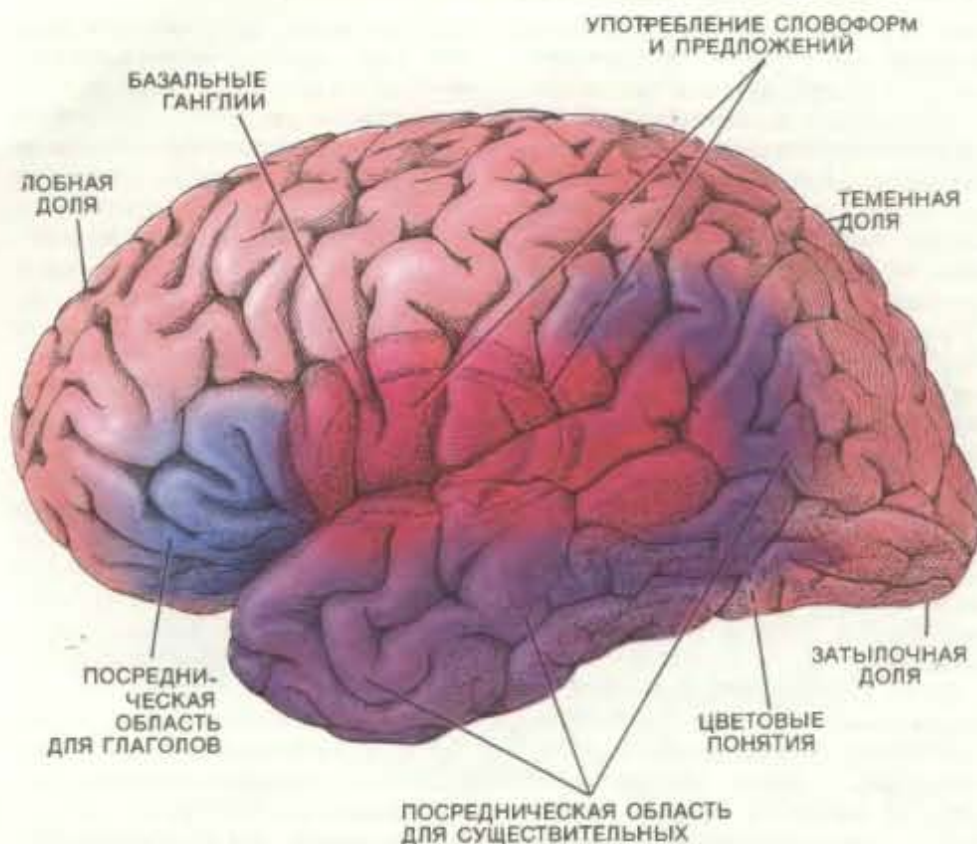
Кроме хранения информации, соответствующей ощущению объектов, мозг также классифицирует ее, чтобы отражения связанных между собой событий и понятий — форм, оттенков, пространственно-временных траекторий и соответствующих им движений и реакций тела — могли реактивироваться вместе. Результат этой деятельности записывается в другой зоне конвергенции. Основные свойства вещей и процессов и любые их взаимосвязи оказываются таким образом представленными во взаимном переплетении. Совокупное пред-

ставление может включать сам факт того, что, скажем, у чашки кофе есть размеры и границы, что она из чего-то сделана и состоит из нескольких частей, что, если ее разбить, чашки не будет в отличие от воды, которая не изменится, на сколько частей ее ни дробить, что чашка движется по некоторой траектории, начиная с одной точки пространства и кончая в другой, что достижение ею конца своего «путешествия» приведет к специфическому эффекту и т. д. Эти аспекты нервного представления очень похожи на примитивы концептуальной структуры, предложенные Р. Джеккендоффом из Университета Брандейса, и на мыслительные семантические схемы, гипотезу о которых высказал Дж. Лакофф из Калифорнийского университета в Беркли, оба — исключительно из лингвистических соображений.

Далее, активность такой сети служит как для понимания, так и для выражения. Она может воспроизводить информацию так, что человек ощущает ее в сознании, или же активировать систему, служащую посредником между понятием и речью, приводя к генерированию подходящих словоформ и синтаксических структур. Так как мозг классифицирует восприятия и действия сразу по множеству направлений, такая архитектура позволяет легко возникать символическим представлениям типа метафор.



РЕЧЕВАЯ АКТИВНОСТЬ коры визуализируется при помощи метода позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) мозга нормального индивида, выполняющего задачи по называнию объектов. ПЭТ-изображение проецировалось на трехмерную реконструкцию мозга того же индивида, выполненную методом ЯМР-визуализации. В левом полушарии заметно много участков повышенной активности, включая моторную кору, передний и задний речевые участки (стрелки). Изображение получено на кафедре неврологии Университета шт. Айова.



РЕЧЕВЫЕ СИСТЕМЫ МОЗГА в левом полушарии включают структуры употребления слов и предложений и структуры-посредники для различных лексических элементов и грамматики. Совокупности нервных структур, представляющих сами понятия, распределены по многим сенсорным и моторным областям обоих полушарий.

ПОРАЖЕНИЕ частей мозга, связанных с этой нервной активностью, должно приводить к дефектам мышления, четко соответствующим определенным категориям, в соответствии с которыми хранятся и воспроизводятся понятия (поражение, приводящее к ахроматопсии, — только один из примеров). Э. Уоррингтон из Национальной неврологической больницы в Лондоне, изучая дефекты распознавания категорий, обнаружила больных, утративших понятие о некоторых классах объектов. Аналогичным образом и мы вместе с нашим коллегой Д. Трейналом показали, что доступ к понятиям, относящимся к некоторым областям жизни, зависит от конкретных нервных зон.

Например, один из наших пациентов, некто Босуэлл, не способен воспроизвести понятия о каких-либо конкретных объектах (человеке, месте или событии), которые были ему прежде знакомы. Он также утратил понятия о некоторых общих классах объектов. Многие животные, например, ему теперь совершенно неизвестны, хотя он сохраняет понятийный уровень, позволяющий ему видеть, что они живые и не относятся к растениям. Видя на рисунке ежота, он говорит: «Это животное», но не имеет ни малейшего представления о его раз-

мерах, местообитании или типичных повадках.

Любопытно, что в отношении ряда других классов объектов его мышление явно не пострадало. Он способен распознавать и называть предметы, например гаечный ключ, которыми можно специфическим образом манипулировать. Он воспроизводит понятия о свойствах объектов — знает, например, красивы они или некрасивы. Он воспринимает, что значит состояние и образ действия типа «быть влюбленным», «прыгать» или «плавать». Он понимает абстрактные отношения между объектами или событиями — «над», «под», «внутри», «из», «перед», «после», «во время» и т. д. У Босуэлла ненарушенные понятия о многих объектах, выражаемых существительными (именами собственными и нарицательными). У него нет проблем с понятиями, соответствующими свойствам, состояниям, действиям и связям, выражаемым наречиями, глаголами, служебными словами (предлогами, союзами, отглагольными формами) и синтаксическими структурами. Синтаксис его предложений совершенно правилен.

ПОРАЖЕНИЯ передних и средних областей обеих височных долей, как у Босуэлла, нарушают понятий-

ную систему мозга. И, напротив, поражения левого полушария вблизи сильвиевой борозды препятствуют правильному образованию слов и предложений. Эта мозговая система наиболее детально изучена нейробиологами, занимающимися проблемами речи. Более полутора веков назад П. Брока и К. Вернике определили примерное положение основных центров речи и открыли феномен, названный церебральным доминированием. Он означает, что у большинства людей речевые структуры локализованы в левом полушарии, а не в правом. Таково их положение примерно у 99% правой и двух третей левой. (Темпы исследований в этой области ускорились в два последних десятилетия в значительной мере благодаря влиянию покойного Н. Гешвинда из Медицинской школы Гарвардского университета и Х. Гудгласса из Медицинского центра Бостонского управления по делам ветеранов.)

Изучение больных с афазией (утративших частично или полностью способность говорить) из различной языковой среды четко демонстрирует постоянство таких структур. В самом деле, Э. Клима из Калифорнийского университета в Сан-Диего и У. Булледжи из Солковского института биологических исследований в Сан-Диего открыли, что повреждение этих систем словообразования в мозгу связано и со знаковой афазией. Глухонемые, страдающие очаговым поражением левого полушария, иногда теряют способность воспроизводить или понимать язык жестов. И дело не в зрительной коре: человек видит знаки, но не может их интерпретировать.

И, напротив, глухонемые с поражениями правого полушария (т. е. расположенными вдали от участков, ответственных за образование слов и предложений), утрачивая способность осознавать объекты в левой половине своего поля зрения или же правильно воспринимать пространственные взаимоотношения между предметами, продолжают употреблять и понимать знаковую речь. Таким образом, независимо от сенсорного канала, через который входит лингвистическая информация, левое полушарие — основа речевой деятельности и посреднических механизмов.

Исследователи закартировали системы, наиболее прямо связанные с образованием слов и предложений, изучая локализацию поражений мозга у страдающих афазией. Кроме того, Дж. Оджемани из Вашингтонского университета и Р. Лессер вместе с Б. Гордоном из Университета Джона Гопкинса сделали то же самое непосредственно электрофизиологиче-

ским методом: стимулируя оголенную кору головного мозга пациентов, оперируемых по поводу эпилепсии.

Например, поражения в задней перисильвиевой области нарушают связывание фонем в слова и отбор целых словоформ. Таким больным не удается произносить некоторые слова или образовывать их («пелетрон» вместо «электрон» и т. п.). Кроме того, они иногда заменяют утрачиваемое слово местоимением или существительным более общего таксономического уровня (например, говорят «люди» вместо «женщина») или применяют семантически родственное слово вместо нужного («начальник» вместо «президент» и т. п.). В. Фромкин из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе выявила множество лингвистических механизмов, лежащих в основе таких ошибок.

Однако поражения этой области не нарушают ритма человеческой речи или ее скорости. Синтаксическая структура предложений не затронута, даже когда наблюдаются ошибки в использовании местоимений и служебных слов типа союзов. Восприятие речи страдает не потому, что, как думали раньше, задняя перисильвиевая зона — центр накопления «значений» слов, а в связи с нарушением акустического анализа слышимых больным словоформ на какой-то более ранней стадии.

Системы этой зоны хранят слуховые и кинестетические записи фонем и их последовательностей, составляющих слова. Нейронные пути, связывающие эти системы, приводят к тому, что активация одной из них генерирует соответствующую работу другой.

НАЗВАННЫЕ области сообщаются с моторной и премоторной зонами коры как непосредственно, так и через подкорковый путь, включающий левые базальные ганглии и ядра передней части левого таламуса. Этот двойной двигательный путь особенно важен: произнесение звуков речи может контролироваться либо корковой, либо подкорковой сетью, либо ими обеими. Подкорковая сеть соответствует «навыковому обучению», а корковая — более осознанному контролю высшего уровня и «ассоциативному научению» (см. статью Э. Кэндела, Р. Хоккина «Биологическая основа обучения и индивидуальности» на с. 43).

Например, когда ребенок заучивает словоформу «желтый», активируются системы словообразования и двигательного контроля, причем как корковым, так и подкорковым путями, а их активность коррелирует с работой мозговых областей, ответственных

за цветовые понятия и связь между ними и речью. Со временем, по нашему мнению, эта понятийно-посредническая система устанавливает прямой путь к базальным ганглиям, поэтому задняя перисильвиевая область уже не должна будет сильно активироваться для формирования слова «желтый». Последующее заучивание словоформ для этого цвета на иностранном языке снова потребует участия данной перисильвиевой области для установления слухового, кинестетического и двигательного соответствия фонем.

Похоже, что как корковая «ассоциативная», так и подкорковая «навыковая» системы действуют во время переработки речи параллельно. Та или иная из них господствует в зависимости от того, как человек овладевал языком, и от природы слова. С. Пинкер из Массачусетского технологического института предположил, например, что большинство людей заучивают прошедшее время неправильных глаголов ассоциативным путем, а правильные (с изменяющейся основой) — навыковым.

Передняя перисильвиевая область (спереди от роландовой борозды), по видимому, содержит структуры, ответственные за ритм речи и грамматику. Левые базальные ганглии — неотъемлемая часть этой области, как и задней перисильвиевой. Вся она, похоже, тесно связана с мозжечком; как в базальные ганглии, так и в мозжечок идут нервные пути от разнообразных сенсорных участков коры; отсюда они возвращаются к зонам, связанным с двигательной активностью. Однако роль мозжечка в речи и мышлении пока не ясна.

Больные с поражениями передней перисильвиевой области говорят без интонации, делая между словами большие паузы, путаясь в грамматике. В частности, они нередко пропускают союзы и местоимения и нарушают грамматический порядок слов. Существительными они пользуются легче, чем глаголами, т. е. образование первых, вероятно, связано с другими областями коры.

Такие больные с трудом понимают значение, придаваемое фразе ее синтаксической структурой. Э. Зуриф из Университета Брандейса, Э. Сафран из Университета Темпла и М. Шварц из Реабилитационной больницы Мосса в Филадельфии показали, что люди, не всегда понимая обратимые пассивные конструкции типа «Парень был целуем девушкой» (и парень, и девушка в равной степени могут быть объектом действия), тем не менее способны понять значение необратимых пассивных оборотов типа «Яблоко было съедено парнем» или же актив-

ного залога — «Парень поцеловал девушку».

Тот факт, что поражение данной области нарушает грамматическую обработку как произносимой, так и слышимой речи, наводит на мысль о присутствии здесь нервных систем, обеспечивающих ее «сборку» на уровне целых фраз. Базальные ганглии служат для объединения компонентов сложных движений в плавное единое целое, поэтому не исключено, что они выполняют аналогичную функцию связывания словоформ в предложения. По нашему мнению (основанному на экспериментальных свидетельствах присутствия сходных, хотя и менее обширных, структур у обезьян), эти нервные структуры тесно взаимодействуют также с синтаксическими посредническими блоками лобно-теменной коры обоих полушарий (см. рисунок на с. 58). Определение точной локализации таких блоков — задача будущих исследований.

МЕЖДУ мозговыми системами обработки понятий и генерирования слов и предложений должны, по нашему мнению, находиться посреднические системы. Свидетельства такого «маклерства» начинают появляться при изучении неврологических больных. Посреднические системы не только подбирают правильные слова для выражения конкретного понятия, но и управляют формированием структуры предложения, отражающей связь между понятиями.

Когда человек говорит, они управляют системами, ответственными за словообразование и синтаксис; когда он слышит речь, словообразующие системы приводят в действие посреднические. Мы уже начали картирование систем-посредников для имен собственных и имен нарицательных, обозначающих объекты определенного класса (например, зрительно неопределенные, управляемые объекты типа большинства животных).

Рассмотрим больных (будем их называть А. Н. и Л. Р.) со стойким поражением передне- и средневисочной коры. Оба нормально воспроизводят понятия: если им показывать рисунки или предметы, относящиеся практически к любой категории — человеческие лица, части тела животных, растения, транспортные средства и строения, инструменты и утварь, — А. Н. и Л. Р. безошибочно узнают, что перед ними. Они могут определить функции объекта, среду, в которой он существует, его ценность. Если предъявить им звуки, соответствующие этим объектам или веществам (лишь бы они с ними как-то ассоциировались), А. Н. и Л. Р. способны

распознать, о чем идет речь. Они справляются с заданием даже с завязанными глазами, когда требуется определить предмет, находящийся в руке.

Однако, несмотря на такую очевидную осведомленность, они с трудом воспроизводят названия многих хорошо знакомых им объектов. Видя на рисунке енота, А. Н. скажет: «О! Я знаю, кто это. Отвратительное животное. Оно будет копаться у вас на заднем дворе, заберется в мусорный ящик. Его выдают глаза и кольца на хвосте. Я его знаю, но, как оно называется, сказать не могу». В среднем они справляются менее чем с половиной названий, которые должны вспомнить. Понятийная система функционирует хорошо, но А. Н. и Л. Р. лишены надежного доступа к словоформам, обозначающим известные им объекты.

Дефицит воспроизводимых словоформ зависит от понятийной категории объекта, который пытается назвать пациент. А. Н. и Л. Р. делают меньше ошибок в существительных, обозначающих инструменты и утварь, чем в названиях животных, овощей и фруктов. (О сходном феномене сообщали Уоррингтон и ее коллега Р. Маккарти из Национальной неврологической больницы в Лондоне и А. Карамаша с коллегами из Университета Джонса Гопкинса.) Однако способность подбирать названия не четко зависит от того, относится объект к природным или рукотворным. А. Н. и Л. Р. безошибочно употребляют слова, обозначающие такие естественные вещи, как части тела, но не могут сделать этого в отношении музыкальных инструментов, не менее искусственных и управляемых человеком, чем садовые инструменты.

Короче говоря, А. Н. и Л. Р. с трудом воспроизводят имена нарицательные, относящиеся к определенным объектам, независимо от того, к какой конкретной категории те относятся. Причины большей или меньшей уязвимости понятий при таких поражениях может быть множество. Естественно, мозг использует неодинаковые нервные системы для представления объектов, различающихся по структуре, поведению или отношению к ним данного человека.

А. Н. и Л. Р. испытывают трудности и с именами собственными. За небольшими исключениями они не могут сказать, как зовут друзей, родственников, знаменитостей, как называются знакомые им места. При виде фотографии Мэрилин Монро А. Н. говорит: «Ее имени я не знаю, но знаю, кто это. Я видел фильмы с ее участием. У нее был роман с президентом. Она покончила жизнь самоу-

бийством, или, может быть, кто-то ее убил; может быть, полиция?». У этих больных нет так называемой агнозии на лица (прогногнозии) — они, не колеблясь, опознают лицо, просто не могут вспомнить словоформу, ему соответствующую.

Интересно, что с глаголами у них трудностей не возникает. В экспериментах, проведенных нами в сотрудничестве с Трейнелом, эти люди показывают такие же результаты, что и контрольные испытуемые, если требуется подобрать глагол в ответ на более чем 200 стимулов, описывающих различные состояния и действия. Они правильно используют предлоги, союзы и местоимения, их фразы хорошо построены и грамматически верны. Когда они пишут или говорят, получается рассказ, в котором вместо недостающих существительных употребляются слова типа «эта штука», «эта вещь», «это», «оно», «они». Однако глаголы, связывающие подобные подлежащие в предложениях, правильно подобраны, произнесены и

оформлены с точки зрения времени и спряжения. В их произношении и просодии (интонации отдельных слов и целого предложения) также нет ничего аномального.

ДАННЫЕ в пользу локализации лексических систем-посредников в специфических областях мозга достаточно убедительны. Действительно, нервные структуры, связывающие понятия и словоформы, по-видимому, расположены вдоль затылочно-височной оси мозга. Системы-посредники для многих общих понятий, похоже, связаны с задними левыми височными областями, а для более специальных — с передними, находящимися вблизи левого височного полюса. Нам уже известно множество больных, не воспроизводящих имена собственные, но владеющих если не всеми, то большинством нарицательных. Поражены у них только левый височный полюс и медиальная височная поверхность мозга, а латеральная и нижняя части височной доли не по-

страдали. Зато две последние всегда повреждены у больных с дефектами воспроизведения имен нарицательных.

Больным типа А. Н. и Л. Р., у которых поражение распространяется на передне- и средневисочную области коры, недостает многих имен нарицательных, но они быстро и правильно называют цвета. Такие корреляции между повреждениями и лингвистическими дефектами указывают, что височная часть левой язычной извилины осуществляет посредничество между понятиями и названиями цветовых тонов, тогда как связь между понятиями о конкретных людях и их личными именами обеспечивается нервными структурами на противоположном конце этой системы — в передней области левой височной доли. Наконец, у одного из наших пациентов, Г. Д., наблюдается обширное поражение мозга, охватывающее все затылочно-височные области левого полушария от переднего и до заднего конца. Он утратил доступ к широчайшему спектру словоформ существи-

тельных, не способен называть цвета и конкретных людей. Однако соответствующие понятия у него сохранились. Эти данные подтверждают открытое Оджеманном нарушение речевых функций после электрической стимуляции коры за пределами классических речевых зон.

По-видимому, уже достаточно ясно, где находятся посреднические области для существительных, но где же они для глаголов? Ясно, что, если больные типа А. Н. и Л. Р. воспроизводят глаголы и служебные слова, области, ответственные за эти части речи, не локализованы в левой височной доле. Предварительные данные указывают на лобную и теменную кору. Исследования афазии, проведенные нашей группой, а также Карамашы и Г. Мичели из Католического университета Сакро-Куоре в Милане и Р. Берндт из Мэрилендского университета, показывают, что при поражении левой лобной области больные испытывают гораздо больше затруднений с глаголами, чем с существительными.

Еще одно косвенное указание получено при исследованиях с помощью позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ), проведенных С. Петерсенем, М. Познером и М. Рейчлом из Университета Вашингтона. Они просили испытуемых назвать глагол, соответствующий изображению объекта; например, рисунок яблока мог сочетаться со словом «жевать» и т. п. У этих людей активировалась область латеральной и нижнедорсальной лобной коры, в общем совпадавшая с той, что была определена в наших исследованиях. Поражения ее не только затрудняли доступ к глаголам и служебным словам, но и нарушали грамматическую структуру произносимых испытуемым фраз. Этот феномен на первый взгляд может показаться удивительным, однако глаголы и служебные слова образуют остов синтаксической структуры. Почему бы системам-посредникам для синтаксиса не перекрываться с их зонами? Дальнейшие исследования больных с афазией, равно как и нормальных испытуемых, мозговую активность которых можно картировать с помощью ПЭТ-сканирования, вероятно, выявят точную локализацию этих систем и дадут карты, сходные с уже полученными нами для зон имен собственных и нарицательных.

В ТЕЧЕНИЕ двух последних десятилетий прогресс в понимании структур мозга, ответственных за речь, существенно ускорился. Такие методы, как ЯМР-визуализация, позволили точно локализовать поражения мозга у больных, страдающих афазией, и поставить в соответствие специфические дефекты речи и конкретные области мозга. ПЭТ-сканирование дает возможность изучать мозговую активность нормальных людей при решении ими лингвистических задач.

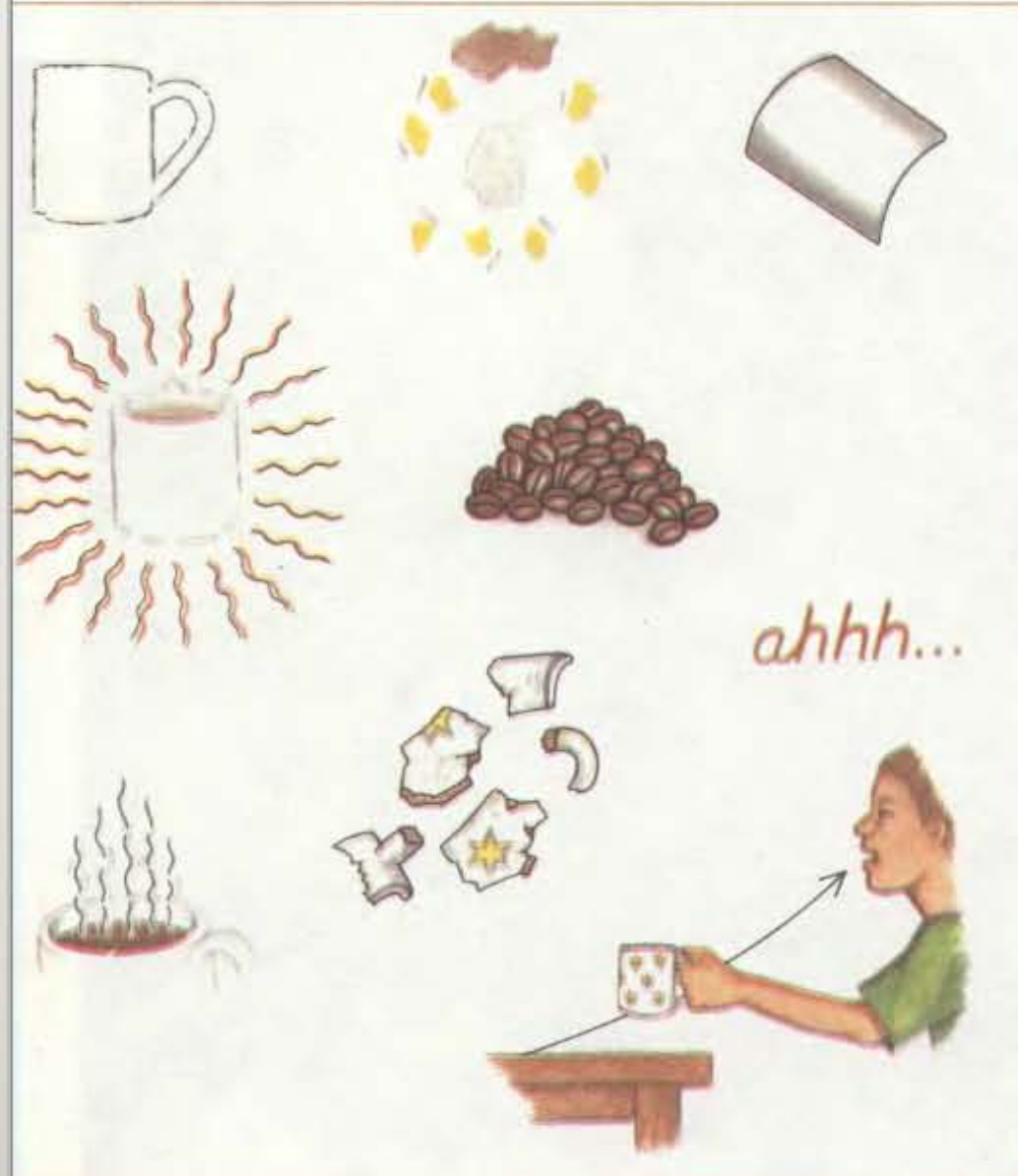
С учетом необыкновенной сложности речевых феноменов может возникнуть вопрос: неужели нервные механизмы, на которых все они основаны, когда-либо станут понятными? Остается еще много неясного относительно накопления в мозгу понятий. Посреднические системы для частей речи, не считая существительных, глаголов и служебных слов, исследованы далеко не полно. Даже структуры, ответственные за образование слов и предложений, изучавшиеся с середины XIX в., понятны лишь в общих чертах.

Тем не менее достигнутые в последнее время успехи позволяют с уверенностью говорить о том, что эти структуры будут в итоге поняты и картированы. Другой вопрос, когда?

Перевод Ю. Амченкова

Компоненты понятия

Понятия запасены в мозгу в форме «дремлющих» отдельных записей. Реактивируясь, они могут воспроизвести различные ощущения и действия, связанные с определенным объектом или категорией объектов. Например, чашка кофе может вызвать зрительные и осязательные представления о ее форме, цвете, текстуре, температуре, о запахе и вкусе кофе, а также о траектории руки, подносящей чашку к губам. Все эти представления воспроизводятся в разных участках мозга, но практически одновременно.





Оперативная память и разум

Изучение анатомии и физиологии обезьян помогает понять, как действует нервный механизм формирования и корректировки внутренних представлений о внешнем мире. Такие представления лежат в основе человеческого мышления

ПАТРИСИЯ С. ГОЛЬДМАН-РАКИЧ

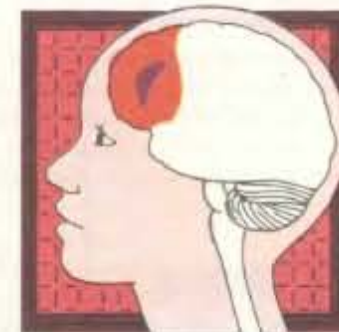
ЗА КАЖУЩЕЙСЯ простотой повседневных дел скрывается необычайно сложная и непрестанная деятельность разума. Даже такие привычные занятия, как поддержание разговора или поездка на работу, требуют сложного взаимодействия между поступающими в данный момент сенсорными сигналами и накопленными прежде знаниями, которые вдруг становятся необходимыми человеку. Сочетание спонтанного осознания и мгновенного вспоминания накопленной ранее информации и составляет основу так называемой оперативной (рабочей, кратковременной) памяти, которую, пожалуй, следует считать самым значительным достижением психической эволюции человека. Благодаря ей люди могут строить планы на будущее и мысленно делать логические построения, и это дало М. Джасту и П. Карпентер из Университета Карнеги—Меллона основание назвать оперативную память «докой объявлений человеческого разума».

До недавнего времени основные процессы, обуславливающие высшие психические функции, не поддавались описанию в механистических терминах науки. На протяжении большей части XX в. нейробиологи считали, что эти функции не могут быть предметом научного анализа, или же заявляли, что они относятся исключительно к компетенции психологии и философии. За последние два десятилетия, однако, неврологи добились значительных успехов в понимании связи между процессами познания и анатомической организацией мозга. В результате даже столь общие психические категории, как «мысль» или «интенциональность» (направленность сознания), можно сегодня изучать в лаборатории.

Конечная цель таких исследований весьма амбициозна. Ученые, в том числе и автор данной статьи, налегают в конце концов научиться описывать высшие психические функции как скоординированную активацию нейронов в разных структурах головного мозга. Возможно, также удастся идентифицировать клетки, посредством которых инициируется активность этих структур. Не исключено, что такие работы помогут объяснить происхождение человеческого разума, а также позволят более глубоко понять такие сложные психические расстройства, как, например, шизофрения.

Изучение деятельности мозга на долгие годы зашло в ту-

ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ позволяет человеку мобилизовать накопленную прежде символическую информацию (например, вспомнить технику владения скрипичным смычком или аппликатуру при исполнении заученной музыкальной пьесы) и перевести эту информацию в контролируемые паттерны двигательной активности. Изучение сходных, хотя и более примитивных, процессов переработки информации у приматов позволяет глубже проникнуть в структуру оперативной памяти у человека.



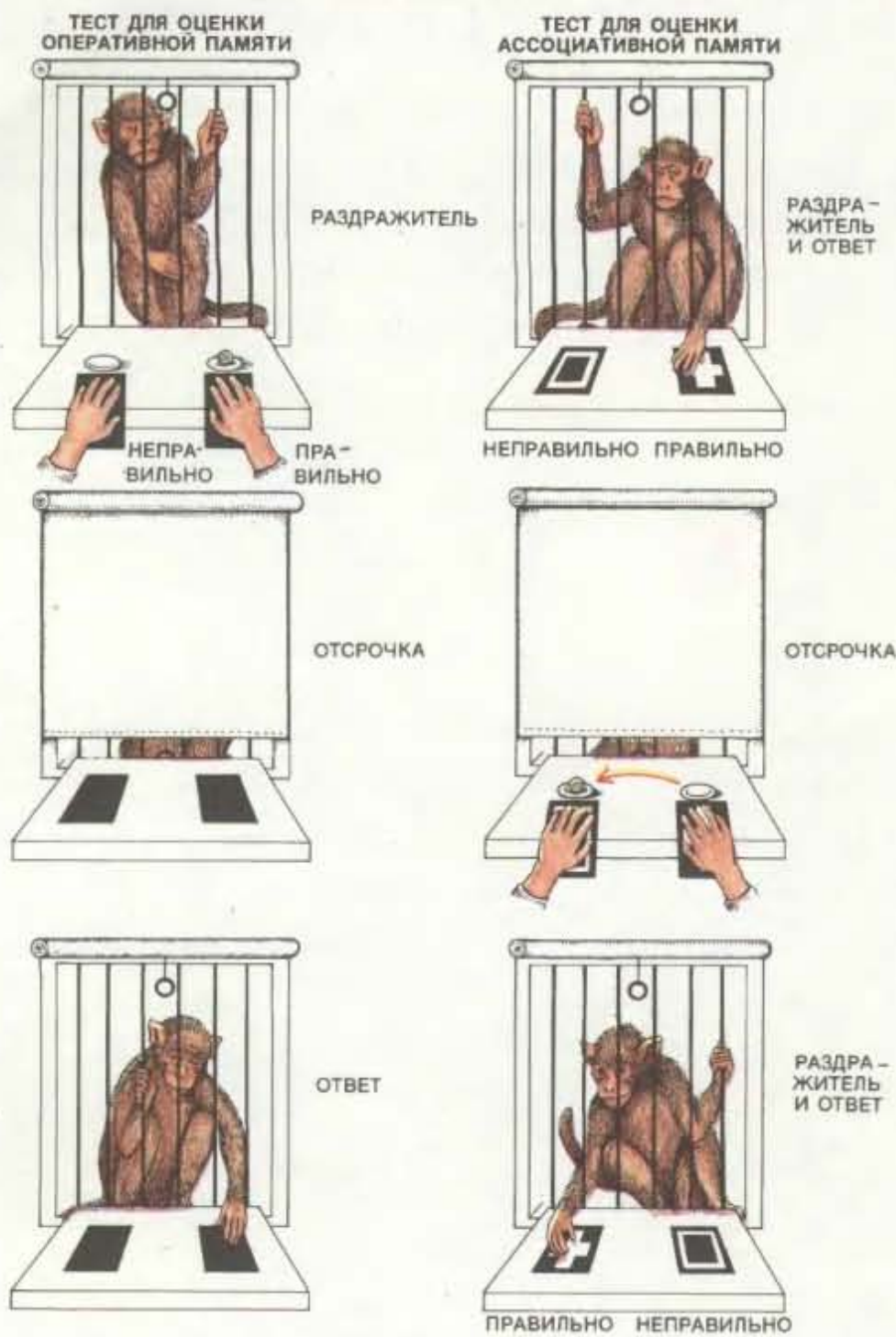
ник из-за ложного представления, будто память является чем-то самостоятельным и локализована в некой единой структуре или области мозга. Начиная с 50-х годов неврологи начинают все больше склоняться к мысли, что память состоит из множества элементов и построена на обширной сети нейронов. Согласно современным представлениям, та форма памяти, которую называют ассоциативной (долговременной), имеет дело с фактами и цифрами и обеспечивает их долговременное хранение. Если, однако,

к этим знаниям не будет доступа и разум не сможет воспользоваться ими в нужный момент для корректировки поведения, они окажутся бесполезными.

Оперативная память дополняет ассоциативную, обеспечивая кратковременную активацию и кратковременное хранение символической информации и возможность манипулирования ею. Примером несложной активности, реализуемой с помощью оперативной памяти, может служить операция переноса при вычислении в уме, требующая временного запоминания ряда чисел и удержания в уме результата одного сложения, пока подсчитывается следующая сумма. В качестве более сложных примеров можно назвать планирование шахматного хода или построение предложения. Считают, что у человека оперативная память имеет решающее значение для речи, обучения и мышления.

МНОГОЧИСЛЕННЫЕ данные говорят о том, что совершаемые в оперативной памяти процессы протекают в той части головного мозга, которую называют префронтальными долями коры больших полушарий. (Кора — это состоящий из нейронов слой так называемого серого вещества, окружающий остальную головную мозг.) Многие данные, позволяющие идентифицировать эти структуры как центр оперативной памяти, получены в результате наблюдений за эффектами повреждения префронтальной области полушарий. Так, больные с поврежденной фронтальной долей испытывают большие трудности в использовании своих знаний для организации поведения в повседневных ситуациях. Между тем накопленная ранее информация нередко сохраняется у них в полном объеме, а их показатели в традиционных тестах оценки интеллектуальных способностей сохраняются на том же уровне, что и до травмы.

Некоторые элементы оперативной памяти, достигшие наивысшей степени развития у человека, присущи и другим животным, особенно приматам; повреждения префронтальной коры у этих животных вызывают симптомы, очень похожие на человеческие. Поэтому для исследования природы оперативной памяти неврологи стали изучать обезьян. Этому способствовала разработка тестов для оценки деятельности оперативной памяти.



ТЕСТЫ НА ЗАПОМИНАНИЕ позволяют оценить деятельность разума. В классическом тесте для оценки оперативной памяти (слева) обезьяне на короткое время предъявляется раздражитель (в данном случае — кусочек пищи). Получить пищу обезьяна может только через некоторое время (отсрочка). Между испытаниями экспериментатор наугад меняет местоположение пищи, так что в каждом отдельном случае реакция животного служит показателем только его кратковременной памяти на зрительные и пространственные признаки объекта. Напротив, в тесте для оценки ассоциативной памяти (справа) все время используется одна и та же экспериментальная схема. Здесь значком «+» обозначены правильные ответы. Таким образом, этот тест позволяет определить способность животного к запоминанию долговременных правил «игры».

Оперативную память у обезьян изучают с помощью процедур, получивших название тестов с отсроченным (отставленным) ответом, позволяющих оценить способность организма реагировать на те или иные ситуации благодаря использованию хранящихся у него («внутренних») представле-

ний, а не той информации, какую он получает из окружающей среды в данный момент. Так, в одном из экспериментальных тестов с отсроченным ответом животному предъявляли короткий зрительный или звуковой раздражитель, который затем прятали или вообще убрали. Спустя

несколько секунд животное получало сигнал о том, что нужно отреагировать на место появления раздражителя. Если реакция была правильной, животное получало вознаграждение (обычно еду или сок).

Изучать процессы оперативной памяти с помощью тестов с отсроченным ответом можно потому, что животному на весь период отсрочки необходимо сохранить в памяти информацию о местоположении раздражителя. В правильности ответа в конце отсрочки убеждают его не какие-то внешние раздражители, но память о том, с чем животное столкнулось в предыдущем испытании. Кроме того, в зависимости от новой информации, которую животное получает в каждом испытании, правильность его реакции от испытания к испытанию может меняться. Правильность ответов в тестах оценки оперативной памяти, как и в повседневной человеческой жизни, определяется скорее способностью к запоминанию, нежели сиюминутной сенсорной информацией, и зависит она от способности постоянно корректировать значимую для организма информацию.

ТЕСТЫ с отсроченным ответом очень сильно напоминают тест постоянства, или нечезаемости объекта, разработанный в начале века швейцарским детским психологом Жаном Пиаже и до сих пор широко используемый для оценки развития когнитивных (познавательных) способностей у малолетних детей. В тесте Пиаже ребенку показывают две коробки, в одной из которых лежит игрушка. Потом коробки закрывают. Спустя короткое время, в течение которого ребенка намеренно стараются отвлечь, его просят показать коробку с игрушкой. После того как ребенок несколько раз подряд даст правильный ответ, игрушку у него на глазах перекладывают в другую коробку. Затем тест продолжают, пытаясь выяснить, изменит ли ребенок характер своих ответов в соответствии с новой информацией.

Как было установлено в ряде исследований, поведение в тесте постоянства объекта, как и способности к выполнению тестов с отсроченным ответом, зависит от степени развития префронтальной коры. Дети, не достигшие 8-месячного возраста, у которых нейронная организация коры еще не имеет характеристик, свойственных взрослому человеку, справляются с такими заданиями плохо — как и обезьяны, у которых префронтальные области удалялись хирургически. В обоих случаях поведение определяется привычкой и рефлексом, а не представлениями. Дети, как

и обезьяны с поврежденным мозгом, обычно просто повторяют тот ответ, который подкреплялся прежде (так, даже после того, как игрушка на глазах у них перекладывают в левую коробку, они продолжают выбирать правую), вместо того чтобы изменить его в соответствии с вновь полученной информацией. И дети, и обезьяны действуют словно по принципу: раз не видно предмета, нечего и думать о нем.

Все это заставляет предположить, что механизмы регуляции поведения с учетом получаемого знания у обезьян с поврежденной префронтальной корой нарушены, а у маленьких детей не получили еще полного развития. Чтобы проверить это предположение, я и еще два сотрудника из Йельского университета — Ж.-П. Буржуа и П. Гольдман-Ракич — решили изучить скорость, с которой образуются нервные связи в префронтальной коре у детенышей обезьян.

Оказалось, что быстрее всего синапсы (межнейронные контакты) в префронтальной коре у животных образуются в возрасте около 2—4 месяцев, т.е. в то время, когда у обезьян появляется способность к выполнению тестов с отсроченным ответом.

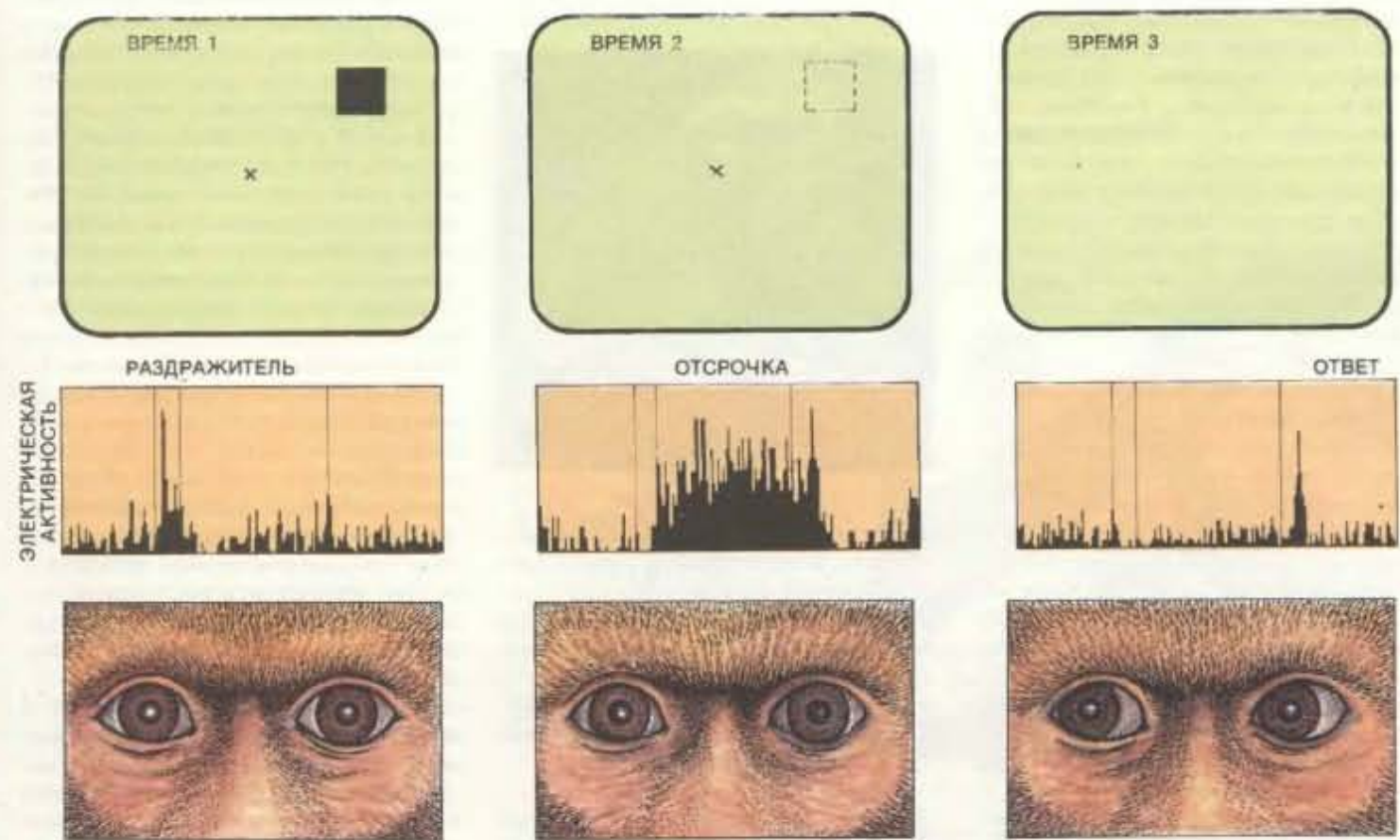
Представление о том, что объект существует во времени и пространстве постоянно, даже если он скрыт от взора, как и вообще способность к образованию абстрактных понятий, может зависеть от фундаментальной способности запоминать представления о внешнем мире и реагировать на эти представления даже тогда, когда сами объекты отсутствуют в поле зрения.

Эти исследования открыли перед учеными заманчивую перспективу более точно идентифицировать структуры мозга, связанные с поведением животных в тестах с отсроченным ответом и сохранением в памяти представлений. Успеху в этом направлении во многом способствовали опыты, в которых электрическую активность отдельных нейронов префронтальной коры регистрировали во время выполнения обезьянами заданий, связанных со специфическими навыками поведения в тестах с отсроченным ответом.

Деятельность отдельных нейронов в префронтальной коре впервые было изучено Дж. Фастером из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и К. Кубота и Х. Ники из Приматологического центра в Киото

(Япония). Обезьянам, обученным выполнять простые тесты с отсроченным ответом, ученые вводили в префронтальную область коры тонкие электроды, с помощью которых регистрировали затем нейронную активность на фоне тех или иных событий задания. Было установлено, что ответы нейронов префронтальной коры во время этих событий сильно варьируют. У одних клеток электрическая активность усиливалась при предъявлении информации, а у других только во время отсрочки, когда животные вспоминали информацию. Нейроны третьей группы наиболее сильно реагировали тогда, когда у животных начиналась двигательная реакция.

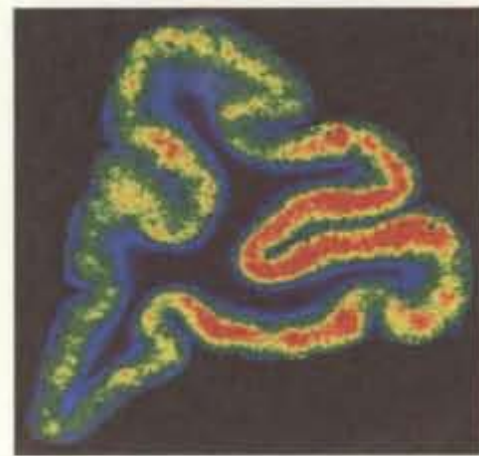
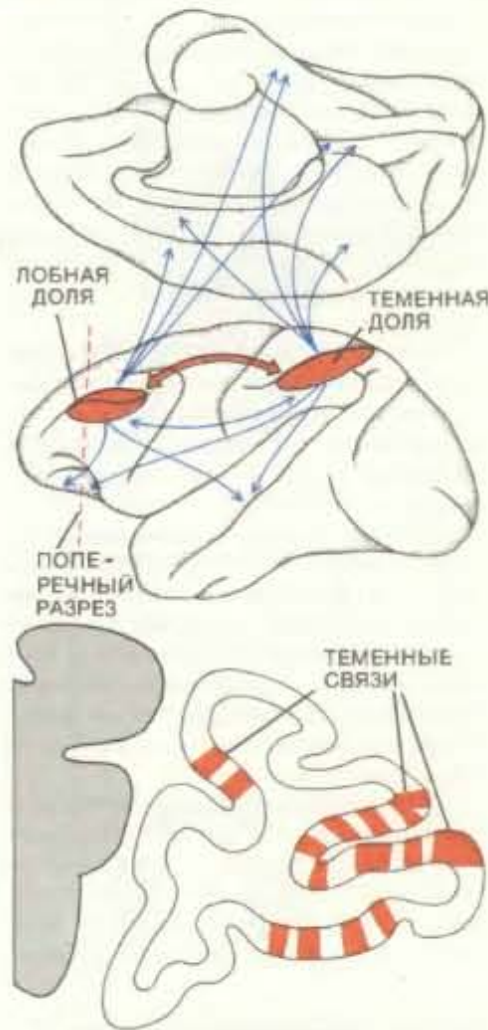
Проводя опыты в Йельском университете, С. Фунахаси, Ч. Брюс и я регистрировали электрическую активность отдельных нейронов в тесте с отсроченным ответом, предназначенном для оценки пространственной памяти. В нашем эксперименте обезьяна обучалась фиксировать взор на маленьком пятне в центре телевизионного экрана. Затем в одном из 8 участков экрана на короткое время появлялся зрительный раздражитель (обычно — небольшой квадрат). В конце отсрочки продолжительнос-



ТЕСТ С ОТСРОЧЕННЫМ ОТВЕТОМ использовался для изучения оперативной памяти у обезьян. Когда обезьяна фиксирует взор на центральном пятне, на экране (слева) всплывает и затем исчезает цель. Во время длительной секунды отсрочки обезьяна хранит об этой цели «мысленную» память (в центре). Когда центральное пятно

исчезает, животное переводит взгляд туда, где появилась цель (справа). Как показывает регистрация электрической активности, некоторые нейроны префронтальной коры реагируют на появление цели, другие сохраняют о ней «мысленную» память, а третьи разряжаются, подготавливая двигательный ответ.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ связывает в головном мозге обезьяны префронтальную кору с сенсорными, лимбической и двигательными системами (вверху). Как показывают анатомические исследования, нервные проекции из теменной доли в префронтальную кору организованы по модульному принципу, что видно из представленного на рисунке поперечного фронтального среза (в середине). Радиоактивное мечение выявляет у обезьяны, выполняющей тест с отсроченным ответом, высокую метаболическую активность в области поперечного фронтального среза мозга (внизу). Распределение активности тесно коррелирует с локализацией анатомических связей.



тью от 3 до 6 с центральное пятно (на котором фиксировался взор) выключалось, что служило животному сигналом о необходимости перевести взгляд в ту точку экрана, где перед отсрочкой появлялся зрительный раздражитель. В случае правильного ответа животное получало вознаграждение (глоток виноградного сока). Поскольку взор животного был жестко фиксирован на центральном пятне, каждый из зрительных раздражителей активировал определенную популяцию клеток сетчатки. Эти клетки в свою очередь приводили в действие лишь строго определенные отделы зрительных проводящих путей мозга.

С помощью этого «глазодвигательного» опыта нам удалось показать, что некоторые нейроны префронтальной коры обладают своего рода «полями памяти»: когда из поля зрения животного исчезает цель, имеющая для него особую значимость, отдельные нейроны префронтальной коры переходят в активное состояние, начиная генерировать электрические сигналы с удвоенной частотой. Такой нейрон пребывает в активированном состоянии до конца отсрочки, когда начинается поведенческая реакция животного. Похоже, что каждый нейрон всегда кодирует своей активностью только определенное местоположение зрительного раздражителя. Так, одни нейроны активируются только при появлении раздражителя на телевизионном экране в положении «9 часов»; такая клетка не отвечает на зрительный стимул, появляющийся в поле зрения обезьяны в какой-либо иной точке. Другие нейроны кодируют в оперативной памяти прочие положения цели.

Нейроны, способные «запоминать» визуальные и пространственные координаты раздражителя (иными словами, способные после его исчезновения «сохранять в памяти» информацию о его местоположении), судя по всему, организованы в пре-

фронтальной коре в специфическую область. В совокупности такие нейроны образуют ядро системы пространственной оперативной памяти. Если во время отсрочки работа какого-либо одного или нескольких таких нейронов нарушится (например, когда животное отвлекают), в поведении животного возможна ошибка.

ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ животным теста с отсроченным ответом активация префронтальных нейронов во время отсрочки не зависит ни от присутствия внешнего раздражителя, ни от совершения животным ответной реакции. Активность нейронов

отражает скорее психическое событие между восприятием раздражителя и поведенческим ответом на него. Обезьяны с поврежденной префронтальной корой без труда переводят взор на видимую цель или дотягиваются до желаемого предмета, но они не в состоянии совершить эти двигательные реакции, вспоминая об уже исчезнувших из их поля зрения целях и предметах.

Поскольку префронтальная кора функционирует как посредник между памятью и действием, можно предположить, что повреждение этой области мозга, по-видимому, не наносит ущерба знаниям животного о внешнем мире, но нарушает его способность осознавать эти знания и пользоваться ими. Действительно, обезьяны с поврежденной префронтальной корой, как и многие люди с аналогичными травмами, без труда обучаются выполнять тесты на сенсорное различение. Все формы ассоциативной, или долговременной, памяти сохраняются до тех пор, пока испытуемый воспринимает знакомые внешние раздражители, ассоциированные с определенными последствиями и ожиданиями (см. статью Э. Кэндела и Р. Хокинса «Биологические основы обучения и индивидуальности» на с. 43).

Усовершенствованные за последние 10 лет методы анатомического изучения мозга позволили впервые получить точную и подробную картину взаимосвязей между префронтальной корой и главными центрами сенсорного (чувствительного) и моторного (двигательного) контроля. Рядом исследователей было показано, что критическую роль в механизмах зрительной и пространственной оперативной памяти играет участок коры около главной (центральной) мозговой борозды — глубокого желоба в префронтальной коре. На этом-то участке коры я и сосредоточила свое внимание, полагая, что послойный нейробиологический анализ одного из главных отделов префронтальной коры может послужить отправной точкой для анатомического анализа и других отделов мозга и поможет нащупать путь к созданию общей теории деятельности всей префронтальной коры в целом.

Как показывает анализ прямых и не прямых нейронных контактов в мозге, префронтальная кора составляет часть тонкой сети реципрокных связей между главной бороздой и основными сенсорными, лимбическими и премоторными зонами мозговой коры. Сеть эта, по-видимому, отвечает за переработку пространственной информации. Возможно, она построена по той же общей схеме, что и дру-

гие подобные нервные сети, рассредоточенные по разным отделам мозга и служащие иным когнитивным функциям — например, распознаванию объектов, речи и ее пониманию, математическому мышлению.

Как уже говорилось, результаты опытов с отсроченным ответом указывают на то, что нейроны в центральной борозде обладают чувствительностью к специфическому положению зрительных раздражителей. Следовательно, такие нейроны должны иметь доступ к зрительной и пространственной информации, перерабатываемой в других отделах мозга. Действительно, центральная борозда получает сигналы из задней теменной коры, где мозг перерабатывает информацию, связанную с пространственным зрением. Как показали клинические исследования, повреждение теменной коры у человека вызывает пространственную дезориентацию, утрату чувства собственного тела и его отношения к другим объектам окружающего мира.

Полагая, что оперативная память зависит от доступности и извлечения информации, хранящейся в долговременной памяти, можно думать, что центральная борозда связана и со структурой мозга, называемой гиппокампом и контролирующей ассоциативную (долговременную) память. Для выявления прямых связей между центральной бороздой и гиппокампом ученые воспользовались радиоактивными изотопами.

Х. Фридман из Йельского университета и я использовали для оценки мозгового метаболизма замечательный метод, известный под названием автораддиографии. Как показали результаты нашей работы, во время выполнения тестов с отсроченным ответом гиппокамп и области центральной корковой борозды часто активируются одновременно. Я и мои сотрудники считаем, что главная функция гиппокампа — консолидация новых ассоциаций, а префронтальная кора необходима для извлечения результатов такого ассоциативного обучения (фактов, событий, правил) из долговременного хранилища в других отделах мозга и их использования согласно обстоятельствам.

Особенно полезной оказалась модификация автораддиографического метода, с использованием 2-дезоксиглюкозы, которая позволила непосредственно проследить, какие участки мозга активируются во время конкретных заданий. Этот метод разработал Луи Соколофф из Национального института психического здоровья; он заключается в том, что животным вводят сахар 2-деокси-

глюкозу, молекула которой идентична молекуле глюкозы, служащей источником энергии в клетках. Чем активнее клетка, тем больше она поглощает 2-дезоксиглюкозы. Но в отличие от глюкозы 2-дезоксиглюкоза в процессе метаболизма не разрушается и потому накапливается в клетке. Соколофф воспользовался радиоактивным аналогом этого соединения. Таким образом, уровень радиоактивности в той или иной области мозга должен быть пропорционален активности ее клеток.

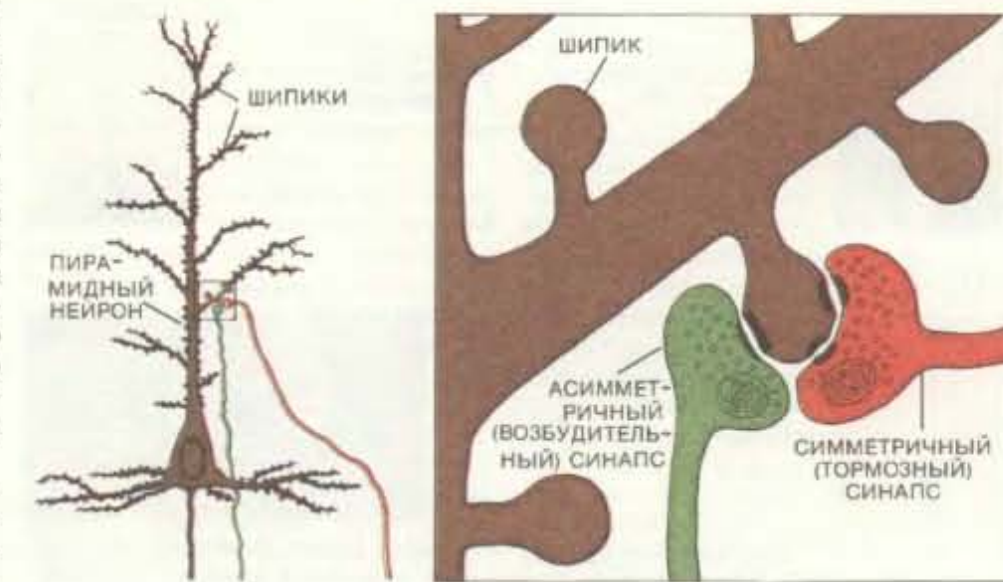
Мы внутривенно вводили радиоактивную 2-дезоксиглюкозу обезьяне, обученной выполнять тесты с отсроченным ответом. Сразу же после выполнения теста животное забивали, и из его мозга извлекали тонкие срезы, которые потом накладывали на фотопленку. Радиоактивность, как известно, засвечивает пленку и вызывает ее потемнение, так что в результате каждой экспозиции получался своего рода фотоснимок метаболической активности клеток в том или ином срезе мозга.

Я и мои сотрудники установили, что префронтальная кора, а также многочисленные области, с которыми она образует связи (например, гиппокамп, нижняя часть теменной коры и таламус), во время выполнения животным теста с отсроченным ответом характеризуются высоким уровнем метаболизма. Метаболическая активность этих отделов мозга заметно слабее, когда обезьяна выполняет задания, связанные с ассоциативной памятью, в которых не тре-

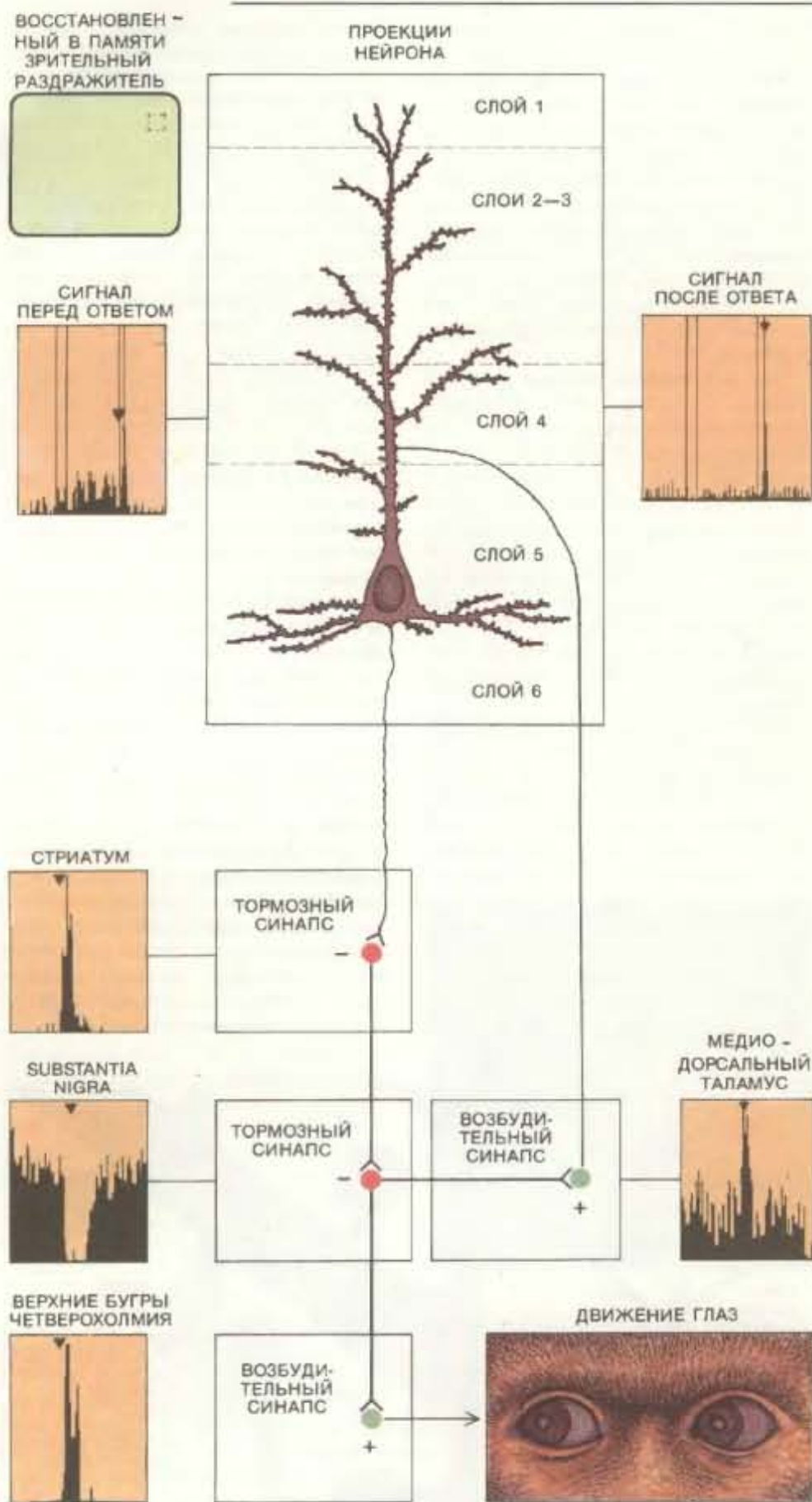
буется быстрая и кратковременная корректировка информации.

ПОЛУЧЕННЫЕ результаты подтверждают данные анатомического анализа связей между префронтальной корой и другими структурами мозга. Они также показывают, в какой степени разные части мозга участвуют в выполнении тех или иных заданий, требующих работы памяти. Проведенные эксперименты позволили, кроме того, понять, как префронтальная кора перерабатывает и организует многочисленные формы протекающей через нее информации. По сути дела паттерны метаболической активности мозга несут совершенно разный характер в зависимости от того, требует ли задание от животного памяти о местоположении предметов или памяти об их признаках.

Я считаю, что префронтальная кора разделена на множество «участков памяти», каждый из которых специализируется на кодировании особого рода информации — местоположения объектов, их признаков (цвета, размеров и формы), а у людей еще и семантических и математических знаний. Недавно сотрудники нашей лаборатории в Йельском университете Ф. Уилсон и Дж. Скелли приступили к изучению области мозга под центральной бороздой, нейроны которой реагируют главным образом на сложные признаки предметов, а не на их местоположение. Они обнаружили здесь клетки, частота импульсации которых увеличивалась в том случае,



ПИРАМИДНЫЙ НЕЙРОН (слева) префронтальной коры, по-видимому, способен модулировать поступающие к ней и выходящие из нее сигналы. Каждый такой нейрон покрыт многими тысячами шипиков — небольшими бугорками, на которых осуществляются синаптические соединения. Морфология синапсов варьирует в зависимости от того, являются ли они возбуждающими или тормозными (справа). Синаптические соединения в коре, содержащие дофамин, относятся к тормозному типу.



СЛОЖНЫЙ ПОТОК НЕРВНЫХ СИГНАЛОВ обеспечивает движение глаз под контролем памяти. Нейрон в пятом слое префронтальной коры мозга передает сигналы цепочке нейронов в полосатом теле, substantia nigra и верхних буграх четверохолмия, где они и инициируют двигательную реакцию глаз. Импульсы из substantia nigra направляются в медиодорсальный таламус и обратно в кору, оповещая префронтальный нейрон о завершении двигательного ответа и подавая ему команду возвратиться к фоновому уровню активности. На диаграммах зарегистрирована электрическая активность нейронов; перевернутые треугольники обозначают путь нервных сигналов, который они пробегают почти мгновенно.

если обезьяне нужно было вспомнить красный кружок, а, скажем, не зеленый квадрат.

Для изучения паттернов активации человеческого мозга и идентификации нейронов, участвующих у человека в выполнении специфических интеллектуальных тестов, все чаще используются неинвазивные методы изображения. Один из них — позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) — во многом схожа с автордиографией: испытуемый должен проглотить радиоактивное соединение, позволяющее проследить изменение кровотока в том или ином отделе мозга, что косвенно указывает на уровень метаболической активности в нем. Регистрация активности человеческого мозга возможна также при помощи метода электроэнцефалографии (ЭЭГ), заключающейся в измерении изменяющихся электрических потенциалов на черепе в ответ на контролирующую сенсорную стимуляцию испытуемого. И ПЭТ, и ЭЭГ по своей чувствительности сильно уступают автордиографии, но для изучения человеческого мозга в процессе умственной деятельности эти методы имеют неограниченное значение.

В Хаммермитской больнице в Лондоне и в Вашингтонском университете с помощью ПЭТ изучали испытуемых, от которых требовалось запоминание перечня слов. В другом эксперименте, проведенном с помощью ПЭТ в Вашингтонском университете, испытуемых просили произнести глагол, который ассоциировался у них с высвечивавшимся на экране существительным. У участников всех трех тестов, каждый из которых требовал работы оперативной памяти, отмечалось усиление нейронной активности в префронтальной коре.

Эти данные дополняются результатами работ Р. Найта из Калифорнийского университета в Дейвисе, изучавшего электроэнцефалограммы больных с поврежденными лобными долями. Испытуемые выполняли задания, в которых требовалось сравнить непосредственно предъявляемые звуковые раздражители со звуковыми раздражителями, предъявлявшимися чуть раньше, и определить, те же самые это раздражители или нет. Электрическая активность мозга у больных с поврежденными лобными долями была совсем не похожа на ЭЭГ здоровых испытуемых, выполнявших то же самое задание, а это указывает на то, что больные люди хранят в памяти недавно поступившую информацию иначе, чем здоровые.

В одном из исследований испытуе-

мым предъявляли неизменные паттерны низких и высоких тонов и внезапные эпизодические звуковые раздражители. У здоровых людей не позднее чем через треть секунды после восприятия аномального звука в коре возникали положительные электрические потенциалы. У больных с поврежденной префронтальной корой такие ответы не возникали, хотя на знакомые фоновые тона они реагировали нормально. Эти данные согласуются с мнением, что в префронтальной коре хранится информация, служащая основой для оценки непосредственно воспринимаемых раздражителей.

В итоге нейроны префронтальной коры выполняют функцию возбуждения или торможения других структур мозга. Таким образом, информация, переработанная в центральной борозде, может влиять на нейроны двигательных центров, которые в свою очередь отвечают за движения глаз, рта, рук и других частей тела. Изучение работы всего мозга в целом позволяет ответить лишь на некоторые вопросы; чтобы детально понять, каким образом нервные сигналы поступают в префронтальную кору и покидают ее, мозг нужно изучать на клеточном уровне.

При помощи обычного микроскопа в коре головного мозга можно различить 6 слоев разного клеточного состава и плотности. Клетки каждого слоя образуют в мозге строго специфические системы связей. Клетки одного типа, находящиеся в пятом слое коры, проецируются в области мозга, расположенные под корой — в хвостатое ядро и скорлупу (регулирующие некоторые формы двигательной активности), и в верхние бугры четверохолмия (специфически связанные со зрительными моторными функциями). Нейроны шестого слоя проецируются в таламус, через который в коре приходят сенсорные сигналы с периферии мозга.

ПРЕФРОНТАЛЬНАЯ кора, судя по всему, неспособна самостоятельно инициировать двигательные ответы. Но она может контролировать двигательное поведение, инициируя, программируя, облегчая или подавляя команды тем мозговым структурам, которые принимают в регуляции движений мышц более непосредственное участие. Такие команды передаются в головном мозге сложной системой химических связей. Нейрофизиологи и биохимики всего света пустились в погоню за сведениями об этих химических связях и механизмах регуляции ими работы мозга.

Изучая мозг грызунов, многие исследователи (среди них — А. М. Тьерри и Ж. Гловински из парижского Коллеж де Франс, Б. Берге из Больницы Питие Сальпетриер в Париже и Т. Хекфельд из Королевского института в Швеции, а также их многочисленные сотрудники) обнаружили, что в префронтальной коре содержится много катехоламинов — соединений, подготавливающих организм к стрессовым ситуациям. Эти соединения могут служить и нейромедиаторами, т.е. посредниками в передаче нервных импульсов в головном мозге. Мои сотрудники и я выявили такое же обилие катехоламинов в префронтальной коре у обезьян. От одного из самых известных катехоламинов, дофамина, зависят ответы нейронов на раздражители; по-видимому, он играет центральную роль в развитии шизофрении.

Все больше данных говорит о том, что дофамин — одно из важнейших соединений, регулирующих клеточную активность, связанную с оперативной памятью. Нарушение дофаминового равновесия в префронтальной коре может вызвать такие же расстройства оперативной памяти, как и повреждение в префронтальной области центральной борозды. Так, старые обезьяны, у которых в префронтальной коре недостает дофамина и другого нейромедиатора, норадреналина, плохо справляются с тестами с отсроченным ответом. Введение старым животным недостающих нейромедиаторов восстанавливает память, и задания они начинают выполнять почти так же успешно, как и более молодые здоровые обезьяны.

Многие из моих коллег (и я в том числе) пытаются выяснить, какие именно клетки реагируют на дофамин и как они влияют на оперативную память. За несколько последних лет у нас накопились данные, указывающие на то, что нейроны некоторых слоев мозговой коры очень богаты рецепторами дофамина определенного типа, а именно D₁. Любопытно, что именно нейроны, богатые рецепторами D₁, проецируются в таламус, где происходит переключение потока информации в кору.

К. Лерант, Дж. Смайли и Ф. Уильямс из Йельского университета изучают клеточные структуры, обеспечивающие дофаминовую модуляцию ответов нейронов коры на приходящие к ней сенсорные сигналы. При этом используются антитела, полученные М. Жеффаром из Института клеточной биохимии и нейрохимии национального центра научных исследований в Бордо (Франция), для меченых тех нейронов и их аксонных проекций, которые содержат дофамин.

Потом они изучают такие клетки под электронным микроскопом. Особое внимание ученые обращают на участки контакта между клетками, высвобождающими дофамин, и нейронными шипиками — небольшими бугорками, где клетка принимает приходящие к ней сигналы. Шипики — это четко ограниченные участки, в пределах которых ионы кальция могут проникать в нейрон и активировать клеточные механизмы, ответственные за переработку информации и модуляцию нейронных реакций.

В большинстве случаев клетки, выделяющие дофамин, образуют с шипиками симметричные контакты: плотность клеточных проекций по обеим сторонам синаптической щели приблизительно одинакова. Полагают, что такие симметричные контакты опосредуют тормозные эффекты: когда возбуждается постсинаптический участок, нормальная, спонтанная электрическая активность клетки подавляется. Немалая часть шипиков пирамидных клеток (основной класс нейронов, проекции которых выходят за пределы коры) характеризуется и асимметричными контактами с аксонами других клеток, локализация которых пока не установлена, но которые, по-видимому, передают сигналы от других корковых областей. Возможно, эти асимметричные контакты обладают противоположным — возбуждающим — действием.

Пирамидные клетки воспринимают все основные сенсорные или информационные сигналы, приходящие в кору мозга. Изученная группой ученых Йельского университета сеть из возбуждающих и тормозных синапсов обеспечивает механизм, за счет которого дофамин мог бы модулировать характер ответа разных типов пирамидных нейронов для интеграции этих сигналов, которые воспринимаются многими тысячами шипиков на их дендритах. Таким образом, дофамин способен контролировать общий выход из коры. Последующий анализ физических и химических взаимодействий между пирамидными клетками и другими нейронами в мозговой коре может пролить свет на то, каким образом дофамин и другие нейромедиаторы влияют на познавательную деятельность мозга, активируя или подавляя клеточные ответы корковых нейронов.

ИЗУЧЕНИЕ механизмов префронтальной коры позволяет не только понять, как работает мозг в целом, но и что именно происходит в том случае, когда его деятельность нарушается. В дисфункции префронтальной коры медики усматривают при-

чину многих неврологических и психиатрических расстройств, включая болезнь Паркинсона и, в особенности, шизофрению. Отмечающиеся при шизофрении аномальные психические сдвиги сильно напоминают симптомы, возникающие в результате физической травмы префронтальной коры: нарушение мышления, ослабление внимания, неадекватные или вялые эмоциональные реакции и отсутствие инициативы, планов и целей. Подобно больным с поврежденными лобными долями и обезьянам с разрушенной префронтальной корой, шизофреники сохраняют нормальную способность к совершенно повседневным и привычным действиям, но демонстрируют непоследовательное, дезорганизованное поведение при выполнении заданий, требующих переработки символической или вербальной информации. См. Бертона и Р. Ридера «Важнейшие психические расстройства и мозг» на с. 73).

При попытке выполнить какой-либо тест (например, Висконсинский тест по сортировке карточек) шизофреники, как правило, повторяют предыдущий ответ, хотя совершенно ясно, что теперь этот ответ уже не правилен; здоровые же испытуемые, напротив, допустив ошибку, сразу же формулируют другое предположение. Поведение шизофреников сильно нарушено и при выполнении пространственных тестов с отсроченным ответом и всевозможных заданий, связанных с решением задач, абстрагированием и планированием.

Изучение мозгового кровотока, проведенное Д. Ингваром из больницы Лундского университета (Швеция) и Д. Вейнбергером, К. Берман и др. в Национальном институте психического здоровья, а также измерение локального мозгового метаболизма, выполненное М. Бухсбаумом из Калифорнийского университета в Ирвине, свидетельствуют о том, что уровень кровотока в префронтальной коре у больных шизофренией понижен, что указывает на подавление активности в этой области мозга. У больных шизофренией нередко нарушается способность следить глазами за движущейся целью и мысленно проектировать ее будущую траекторию — еще одно указание на то, что это заболевание связано с нарушением деятельности задней части префронтальной коры, где расположены глазодвигательные центры, участвующие в мысленном предсказании траектории движения.

Как показали З. Парк и Ф. Холдман из Гарвардского университета, больные шизофренией плохо справляются с такими заданиями, связанны-

ми с работой оперативной памяти, которые очень похожи на тесты, проводившиеся нами при изучении оперативной памяти у макаков-резусов. И наоборот, М. Макавой и Ч. Брюс из Йельского университета обнаружили, что у обезьян с повреждением соответствующих участков префронтальной коры возникает в точности такое же расстройство мысленной экстраполяции траектории движения, какое у человека издавна считалось признаком шизофрении.

Похоже, следует рассматривать шизофрению как нарушение процессов, благодаря которым осуществляется регуляция поведения человека хранящимися у него в памяти представлениями. На мой взгляд, нервные пути префронтальной коры выполняют функцию корректировки внутренней модели реальности, что позволяет учитывать изменения требований окружающей среды и поступающей информации. Эти системы и контролируют кратковременную память и сиюминутное поведение. Если они на-

рушаются, мозг начинает воспринимать внешний мир как серию не связанных между собою событий, а не как непрерывную их последовательность, как демонстрацию слайдов, а не фильма. Результат — шизофреническое поведение, в регуляции которого доминирующее значение принадлежит сиюминутной стимуляции, а не сбалансированной должным образом текущей, внутренней и прошлой информации.

Современные теории глубинных причин шизофрении столь же несовершенны, как крайне поверхностны наши знания о системе оперативной памяти. К счастью, в последние годы нейробиологические исследования продвигаются с головокружительной быстротой. И они, вероятно, приведут к более глубокому пониманию не только шизофрении, но и функций префронтальной коры, ее роли в процессах оперативной памяти и к более широкому взгляду на мышление.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

Ночное зрение

ТАНК М1, состоящий на вооружении американской армии, оснащен инфракрасными датчиками переднего обзора, предназначенными для определения местоположения военной техники противника и целей, которые необходимо поразить. Во время войны в Персидском заливе эти датчики позволяли танкам объединенных союзнических войск вступать в бой в кромешной темноте. Армия покупает такие тепловизионные устройства по ценам, превышающим 100 тыс. долл. за штуку.

Две электронные фирмы — Texas Instruments и Honeywell, — решив «перекрестить мечи на орала», подготавливают инфракрасные приборы для коммерческого рынка. К концу текущего десятилетия такие приборы будут продаваться в магазинах бытовой электроники по ценам, не превышающим стоимость видеокамеры. Их можно будет использовать в системах ночного видения для автомобилей, а также в системах охраны жилища и в устройствах обнаружения мест утечки тока через изоляцию.

В течение уже более пяти лет указанные фирмы на основе отдельных контрактов сотрудничают с военными ведомствами и другими федеральными агентствами, разрабатывая новое поколение легких недорогих инфракрасных видеокамер, которые в

скором времени можно будет устанавливать на башенном оружии танка М16. Управление по приборам ночного видения и оптико-электронным устройствам министерства обороны США недавно рассекретило данную программу в надежде, что обширный рынок товаров народного потребления, заинтересовавшись этими системами, потянет вниз цену на камеры, а также потому, что в Великобритании и Австралии полным ходом идут работы над такими устройствами.

Опираясь на свой опыт в производстве интегральных схем, Texas Instruments и Honeywell смогли создать однокристалльную микросхему с 80 тыс. теплочувствительных элементов, каждый из которых может «уловить» изменение температуры (по изменению инфракрасного излучения) величиной в одну десятую градуса Цельсия и даже меньше. Приборы обладают чувствительностью и разрешающей способностью, достаточными для создания изображений, на которых можно различить черты лица человека и артерии на его шее, а также для получения «температурных отпечатков» — тепловых следов, остающихся после прикасания пальцев к книге или к какому-либо другому предмету.

Эти камеры пока обладают лишь одной десятой теплочувствительности дорогостоящих датчиков, устанавливаемых на танках М1 и военных



МИННЕАПОЛИС после наступления темноты на этом снимке, сделанном с помощью инфракрасной видеокамеры фирмы Honeywell, установленной на автомобиле (сле-



ва). Огни идущих вперед автомашин — так как они видны на некотором расстоянии через ветровое стекло — на фотографии справа.

самолетах. В этих так называемых квантовых детекторах используется такой материал, как теллурид ртути-кадмия. В отличие от видеокамер, которые вскоре должны появиться на коммерческом рынке, детекторы на основе теллурида ртути-кадмия требуют применения дорогостоящих и сравнительно ненадежных криогенных систем для устранения теплового шума. «На доводку этой устаревшей технологии ушло невероятное количество долларов, и при этом мы все еще не имеем дешевой системы», — говорит Норман Фосс, возглавляющий отдел исследований и разработок датчиков в фирме Honeywell.

Прибор фирмы Honeywell является результатом первого коммерческого применения сравнительно нового производственного процесса, называемого «поверхностной микрообработкой». На основе использования фотолитографии, травления и других методов, применяемых при изготовлении интегральных схем, с помощью поверхностной микрообработки можно изготовить из кремния опорные структуры на поверхности микрокристалла. Фирма Honeywell осуществила вытравливание матрицы из 336 x 240 пикселей (элементов изображения) в окиси ванадия. Имея длину стороны около 50 мкм, каждый такой пиксел подвешен между опорными структурами с помощью крошечных стоек, подающих ток к детектору. Такое устройство, кроме того, обеспечивает термозащиту.

Инфракрасный объектив фокусирует изображение на детекторной матрице. Транзисторы, расположенные на этом же кристалле, по одному под каждым пикселом, включают и выключают ток 30 раз в секунду. Изменение величины теплового излучения, падающего на пиксел, изменяет сопротивление окиси ванадия, что в свою очередь меняет силу тока.

Технология, избранная фирмой Texas Instruments, основывается на использовании керамики на основе титаната бария и стронция. Лазер (того же типа, что и применяемый в полупроводниковом производстве для подгонки резисторов и конденсаторов) «вытравливает» отдельные пиксели. Керамика является ферроэлектрическим материалом, т. е. материалом, на котором происходит изменение электрического заряда, когда он подвергается воздействию электрического поля или, как в случае рассматриваемой микросхемы, — изменению температуры. Когда какой-либо элемент изображения нагревается или охлаждается, изменение заряда (или емкости) воспринимается различными элементами схемы.

На данный момент производственный процесс, выбранный фирмой Honeywell, является потенциально более дешевым, чем лазерное травление, поскольку он основывается на обычных методах изготовления микросхем. Texas Instruments разрабатывает аналогичный способ производства, и ее камера ближе к коммерческому рынку. Этой фирме удалось «запечатлеть» оптику, детекторы и электронные схемы обработки сигнала в один блок, весящий всего 1,8 кг. Система же Honeywell состоит из нескольких отдельных блоков, соединенных проводами.

И Texas Instruments, и Honeywell утверждают, что они тесно сотрудничают с крупнейшей автомобильной компанией, хотя ни та ни другая не предоставили дополнительных подробностей относительно этого. (Texas Instruments имеет рабочее соглашение с General Motors и ее дочерней компанией Hughes Aircraft, производящей продукцию военного назначения.) Камера с дисплеем, установленным на щитке управления, не только увеличила бы вдвое поле обзора, обеспечивае-

мое в настоящее время фарам автомобиля — от приблизительно 15 до 30 градусов по горизонтали, — но также позволила бы водителю в несколько раз увеличить дальность видения дороги — от 150 до 900 м.

Интерес к новой продукции проявляют также страховые компании, которые могли бы использовать новые камеры для проверки стен домов на наличие в них «горячих мест», образующихся в результате неисправностей в электропроводке. Инфракрасные камеры могли бы, кроме того, оказаться полезными в системах охраны жилищ, а также для служб, осуществляющих контроль за случаями незаконного провоза и хранения наркотиков, для полиции и пограничной охраны. Военные были озабочены тем, что после рассекречивания новые инфракрасные системы могут попасть в руки торговцев наркотиками или террористов. «У торговцев наркотиками гораздо больше денег, чем у полицейских управлений», — говорит Джеймс Миллер, физик из Управления по приборам ночного видения и оптико-электронным устройствам министерства обороны.

Дальнейшее уменьшение размеров датчиков и электроники могло бы привести к появлению инфракрасных очков, которые позволили бы совершать прогулки в самое темное время ночи. Существующие очки ночного видения имеют один недостаток: они усиливают лунный свет или свет от каких-либо других источников низкочастотного излучения. Вопреки тому, что показано в популярном фильме «Молчание ягнят», эти очки не могут функционировать в полной темноте. Инфракрасные же очки дали бы возможность тому, кто их наденет, увидеть внушающий ужас мир «призраков», состоящих из ночного тепла.

Гэри Стикс



Половые различия в организации мозга

Особенности когнитивных способностей у мужчин и женщин отражают разное влияние гормонов на развитие мозга. Изучение этих особенностей и их причин может привести к более глубокому пониманию организации мозга

ДОРИН КИМУРА

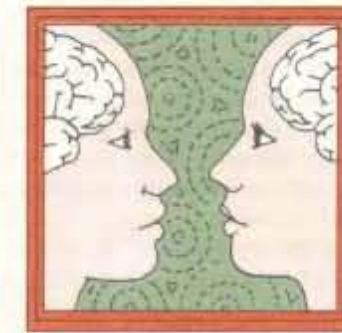
ЖЕНЩИНЫ и мужчины различаются не только физическими характеристиками и репродуктивными функциями, но и тем, как они решают интеллектуальные задачи. Некогда было модно утверждать, что эти различия очень незначительны и являются результатом разного опыта во время индивидуального развития. Однако, как свидетельствуют многочисленные данные, половые гормоны начинают влиять на организацию мозга в таком раннем возрасте, что действие внешней среды на по-разному «смонтированный» мозг мальчиков и девочек различается почти сразу после рождения. Из-за этих различий практически невозможно оценить эффекты, которые обусловлены индивидуальным опытом и не зависят от физиологической предрасположенности.

Поведенческие, неврологические и эндокринологические исследования пролили свет на те процессы, которые порождают половые различия в организации мозга. В результате в последние годы стали понятнее и физиологические аспекты этих различий. Кроме того, как показывает изучение действия гормонов на функции мозга в течение всей жизни человека, можно, по-видимому, думать, что факторы эволюции, определившие эти различия, все-таки оставили за когнитивными способностями мужчин и женщин некоторую пластичность.

ГЛАВНЫЕ половые различия интеллектуальных функций, по-видимому, скорее связаны с характером умственных способностей, нежели с общим уровнем интеллекта (IQ — коэффициентом интеллектуальности). Хорошо известно, что разные люди обладают разным складом ума. Одни особенно хорошо владеют языком, другие умело орудуют предметами (например, что-нибудь конструируют или ремонтируют). Два человека с одинаковым общим уровнем интеллекта могут различаться характером умственных способностей.

Мужчины, как правило, лучше, чем женщины, решают пространственные задачи. Так, мужчины обнаруживают преимущество в тестах, в которых испытуемый должен мысленно вращать предмет или манипулировать им как-

МАРШРУТЫ на местности, например изображенные на картине Анны Мозес (1860—1961) "Old Oaken Bucket", мужчины и женщины могут запоминать по-разному. Как показано в лабораторных условиях, женщины обычно запоминают ориентиры местности (колодец в нижнем правом углу или дерево у развилки дорог). Мужчины запоминают маршруты быстрее, но они не так легко, как женщины, могут вспомнить ориентиры: по-видимому, они предпочитают полагаться на такие пространственные характеристики, как расстояние и направление.



нибудь иначе. Они превосходят женщин в тестах, требующих математических рассуждений, и лучше ориентируются в пути, следуя по какому-нибудь маршруту. Мужчины, кроме того, проявляют более точные двигательные навыки в тестах с прицеливанием (например, при метании и перехвате различных снарядов).

Женщины, как правило, превосходят мужчин в скорости идентификации сходных предметов (характеристика, получившая название скорости восприятия). У

них лучше развиты речевые навыки, включая способность находить слова, начинающиеся с определенной буквы или обладающие какими-нибудь другими особенностями. Женщины превосходят мужчин в арифметическом счете и лучше вспоминают ориентиры местности. Женщины быстрее справляются с некоторыми мануальными заданиями, где требуется точность (например, быстрее вставляют колышки в просверленные в доске отверстия).

Хотя, как сообщают некоторые исследователи, половые различия в решении интеллектуальных задач появляются у детей лишь после полового созревания, сотрудница моей лаборатории в Университете Западного Онтарио Диана Ланн и я обнаружили, что трехлетние мальчики лучше справляются с заданиями, требующими прицеливания, чем девочки того же возраста. Работавший в моей лаборатории Нил Уотсон показал, кроме того, что прошлый спортивный опыт не влияет на выраженность половых различий у молодых людей при прицеливании. Кимберли Кернз и Шери Беренбаум из Чикагского университета установили, что половые различия при выполнении заданий, связанных с пространственным вращением предметов, существуют у детей еще до полового созревания.

Половые различия в способности взрослых людей при запоминании маршрутов систематически изучались в лабораторных условиях. Так, в опытах Линзы Галеа в нашей лаборатории студенты-выпускники «следовали» по определенному маршруту по разложенной на столе карте. Мужчинам требовалось на запоминание маршрута меньше повторов, и ошибок они совершали меньше. Но когда испытуемые полностью выучили маршрут, оказалось, что женщины могут вспомнить больше «дорожных ориентиров», чем мужчины. Эти результаты и данные других исследователей заставляют предполагать, что у женщин склонность пользоваться наглядными ориентирами — общая стратегия, которой они руководствуются и в повседневной жизни. Неясно пока, к каким стратегиям прибегают для этих целей мужчины, но, судя по всему, эти стратегии должны быть связаны с их способностью к пространственной ориентации.

Мария Илз и Ирвин Силверман из Йоркского универси-

Тесты для женщин

Женщины, как правило, лучше, чем мужчины, выполняют тесты для оценки быстроты восприятия, в которых испытуемые должны быстро идентифицировать одинаковые раздражители, например, определить, какой домик на рисунке идентичен с самым левым:



Женщины лучше помнят, изменилось ли местоположение одного или нескольких предметов:



Женщины превосходят мужчин в некоторых тестах на быстроту соображения, в которых, например, нужно перечислить предметы какого-нибудь одного цвета, и в тестах для оценки вербальных способностей, где испытуемые должны перечислить слова, начинающиеся с какой-либо определенной буквы:

Л лавка, ладонь, лазер, лайнер, ласты, лебедь, лед, любовь, люди, лист, липовый, лошадь

Женщины лучше справляются с заданиями, требующими точных движений руки, т. е. с такими заданиями, когда нужна тонкая координация движений, например при втыкании колышков в отверстия в доске:



Женщины превосходят мужчин в арифметическом счете:

77	$14 \times 3 - 17 + 52$
43	$2(15 + 3) + 12 - \frac{15}{3}$

тета изучали другую функцию, которая также может быть связана с памятью на пространственные ориентиры. Ученые оценивали способность испытуемых запоминать предметы и их расположение в замкнутом пространстве, например, в комнате или на поверхности стола. О том, перемещался предмет или нет, более точно вспоминали женщины. У себя в лабор-

атории мы оценивали точность запоминания местоположения предметов: испытуемым показывали множество предметов, а затем, после перестановки, просили разложить их точно по прежним местам. Женщины справлялись с этим заданием точнее.

Поскольку в одних случаях половые различия незначительны, а в других — велики, важно увязывать их с конкретным экспериментальным контекстом. Так как во многих когнитивных тестах, выявляющих средние половые различия, мужчины и женщины часто имеют во многом совпадающие показатели, исследователи в качестве инструмента для оценки межгрупповых различий используют разброс показателей внутри каждой группы. Допустим, например, что в некоем тесте у женщин средний показатель был 105, а у мужчин — 100. Если показатели в женской группе варьировали от 100 до 110, а в мужской — от 95 до 105, то различия в этом случае будут впечатлять больше, чем в том, когда показатели в женской группе варьируют от 50 до 150, а в мужской — от 45 до 145. В последнем случае совпадение показателей должно было бы быть гораздо большим.

Оценить разброс показателей внутри группы позволяет стандартное отклонение. Для того чтобы сравнить величину половых различий в нескольких конкретных заданиях, различия между группами надо разделить на величину стандартного отклонения. Полученная величина называется «размером эффекта». Размер эффекта меньше 0,5 обычно считается небольшим. Согласно моим данным, например, в тестах словарного запаса (размер эффекта 0,02), невербальных рассуждений (0,03) и вербальных рассуждений (0,17) половые различия отсутствуют.

В тестах, где от испытуемых требуется идентифицировать одинаковые картинки, найти слова, начинающиеся с определенной буквы, или проявить быстроту соображения (например, назвать только белые или только красные предметы), размер эффекта несколько больше: 0,25, 0,22 и 0,38 соответственно. Как уже говорилось, женщины справляются с такими заданиями обычно лучше мужчин. Наибольший размер эффекта обнаружен в некоторых тестах, связанных с пространственным вращением предмета (размер эффекта 0,7) и точностью прицеливания (0,75). Большой размер эффекта в этих тестах означает, что высоких показателей в них чаще добивались мужчины.

ПОСКОЛЬКУ, за исключением половых хромосом, генетический материал у мужчин и женщин одина-

ков, правомерно спросить, откуда берутся все эти различия? Скорее всего разное «качество» умственных способностей у мужчин и женщин отражает различия в гормональных влияниях на развивающийся мозг. Разделение полов происходит на ранних этапах жизни эмбрионального развития под действием эстрогенов (женских половых гормонов) и андрогенов (мужских половых гормонов, главный из которых — тестостерон). У млекопитающих, в том числе и у человека, организм может стать либо мужским, либо женским. Если присутствует Y-хромосома, развиваются мужские половые железы — семенники. Этот процесс — первый критический шаг на пути формирования мужской особи. Если половые железы не вырабатывают мужских гормонов или если по каким-либо причинам гормоны эти не могут действовать на ткани, неизбежно развивается женская форма организма.

Сформировавшись, семенники начинают вырабатывать два вещества, вызывающие развитие самца. Тестостерон вызывает маскулинизацию, способствуя образованию мужской системы половых протоков, называемых вольфовыми, а опосредованно, превратившись в дигидротестостерон, — появлению наружных половых органов — мошонки и полового члена. Специфический фактор регресса заставляет исчезнуть женскую систему протоков, называемых мюллеровыми. Если на какой-либо стадии этого процесса что-нибудь расслаивается, особь может оказаться маскулинизированной не полностью.

Половые гормоны способствуют не только образованию мужских половых органов, но и формированию на ранних этапах жизни соответствующих стереотипов мужского поведения. Поскольку гормональной средой у человека манипулировать нельзя, многим из того, что известно о гормональном детерминировании поведения, мы обязаны опытам на животных. Работы Роберта Гоя из Висконсинского университета еще раз подтверждают общую тенденцию развития женских стереотипов поведения в отсутствие маскулинизирующих гормональных влияний.

Если только что родившегося грызуна с функционирующими мужскими половыми органами лишить андрогенов (путем кастрации либо введения веществ, блокирующих действие андрогенов), мужское половое поведение (например, попытки совершить садку) ослабнет. Вместо этого в зрелом возрасте у такого животного усилится женское половое поведение (например, лордоз — прогибание спины перед спариванием). Аналогичным

образом, введение самке сразу же после рождения андрогенов приведет к тому, что в зрелом возрасте выраженность мужского полового поведения у нее увеличится, а женского — уменьшится.

Брюс Макьюэн и его коллеги из Рокфеллеровского университета показали, что у крыс два описанных процесса — дефеминизация и маскулинизация — требуют несколько иных биохимических сдвигов в организме. И разворачиваются они в несколько иные сроки. Тестостерон может превращаться либо в один из эстрогенов, либо в дигидротестостерон. Дефеминизация происходит у крыс главным образом после рождения и опосредуется эстрогенами, а маскулинизация требует участия как дигидротестостерона, так и эстрогенов, и, согласно данным Макьюэна, по большей части предшествует рождению животного. Возможно, защищает мозг самки от маскулинизирующего влияния эстрогенов вещество, называемое альфа-фетопротеином.

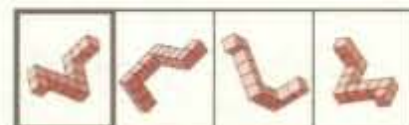
В мозге организационной женского и мужского репродуктивного поведения ведает крохотная структура, расположенная в основании мозга и называемая гипоталамусом. Гипоталамус связан с главной эндокринной железой организма — гипофизом. Роджер Горски и его коллеги из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе показали, что один из участков так называемой преоптической области гипоталамуса у самцов крысы заметно больше, чем у самок. Более выраженное увеличение размеров тела у самцов обусловлено присутствием андрогенов в ранней постнатальной, а отчасти и в пренатальной жизни. Как показала Лаура Аллен, сотрудница Горски, такие же половые различия свойственны и человеческому мозгу.

Другие любопытные исследования предварительного характера также указывают на то, что половое поведение может отражать анатомические особенности организма. В 1991 г. Саймон Левэй из Солковского института биологических исследований в Сан-Диего сообщил, что один из участков мозга, который у мужчин обычно больше, чем у женщин, — интерстициальное ядро переднего гипоталамуса, — у мужчин-гомосексуалистов меньше, чем у гетеросексуальных мужчин. Как подчеркивает Левэй, этот факт подтверждает точку зрения, что в основе половых предпочтений лежит биологический субстрат.

Гомосексуалисты и гетеросексуалы могут различаться также и выполнением когнитивных тестов. Брайан Глэзью из Университета шт. Северная Дакота и Джеф Сандерз из Лон-

Тесты для мужчин

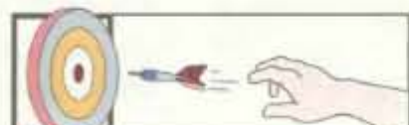
Мужчины, как правило, лучше, чем женщины, выполняют пространственные тесты. Они успешнее справляются с заданиями, требующими мысленного вращения предмета:



или каких-нибудь иных манипуляций с ним, например, когда нужно определить, как будут располагаться дырки, пробитые на сложенном листе бумаги, если его развернуть:



У мужчин выше точность двигательных навыков, связанных с прицеливанием, например, при метании и перехвате различных снарядов:



Они успешнее выполняют задания по различению, в которых нужно отыскать простую фигуру (на рисунке — слева), «спрятанную» в сложной:



Мужчины превосходят женщин в тестах для оценки математических способностей:

1,100	Сколько саженцев нужно посадить, чтобы выросло 660 деревьев, если приживается только 60% саженцев?
-------	--

стенах картинки, нежели геометрические «подсказки» — углы и форму комнаты. Но если наглядных ориентиров не было, самки пользовались геометрическими. Напротив, самцы вообще не пользовались наглядными ориентирами, отдавая предпочтение почти исключительно геометрическим.

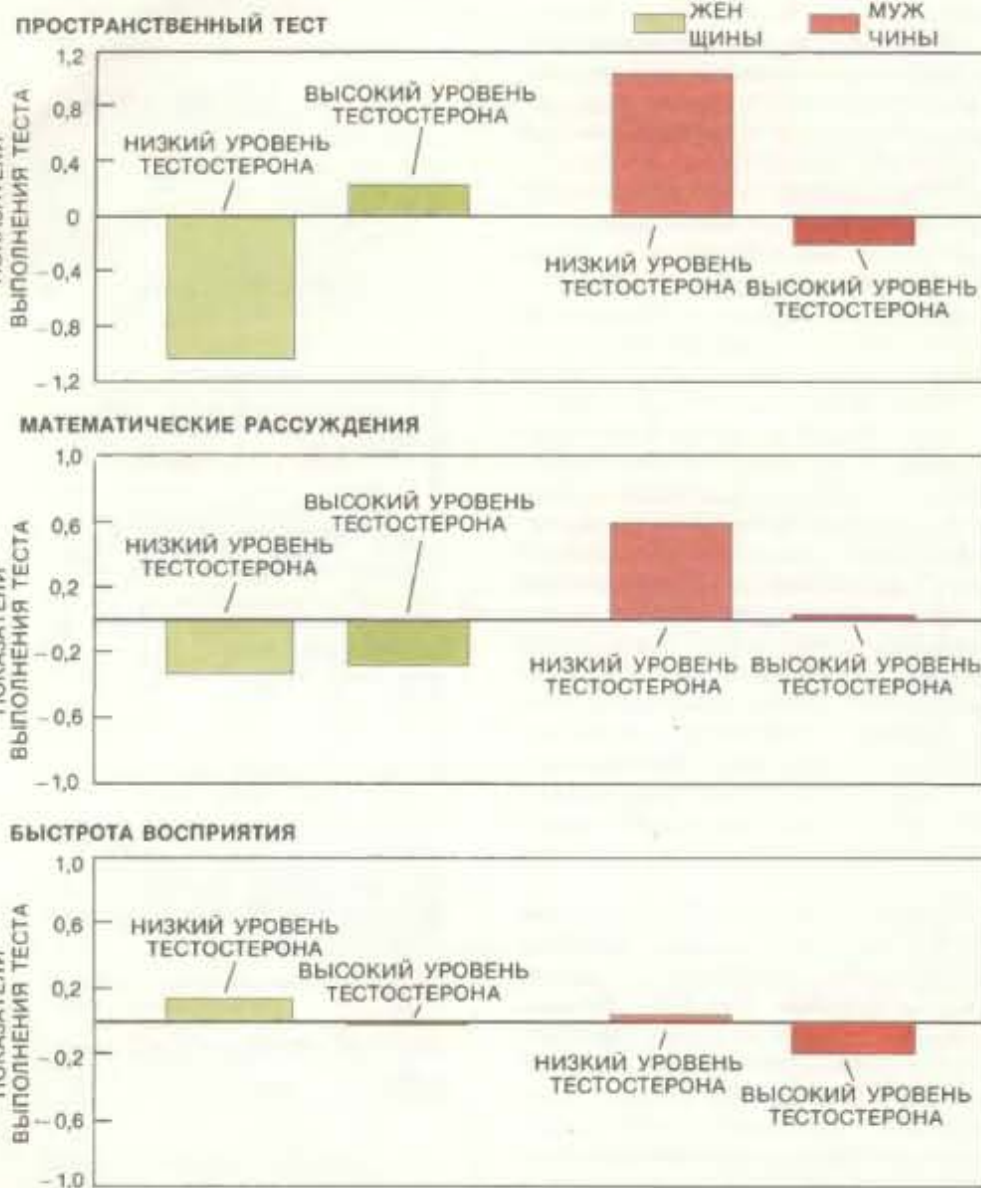
Любопытно, что, изменяя гормо-

нального политехнического института сообщают, что мужчины-гомосексуалисты хуже справляются с некоторыми пространственными заданиями, чем гетеросексуалы. Недавно наш сотрудник Джефф Холл обнаружил, что показатели гомосексуальных мужчин в тестах на прицеливание ниже, чем у гетеросексуальных; гомосексуалисты, однако, превосходят последних быстротой соображения (в тесте, требующем перечисления предметов определенного цвета).

Работа в этой волнующей области знаний только началась, и поэтому важно, чтобы исследователи учитывали тот вклад, который привносится в межгрупповые различия различиями в образе жизни испытуемых. Следует также помнить, что результаты, касающиеся межгрупповых различий, отражают общие статистические тенденции; они определяют лишь некое среднее, от которого индивид может отличаться. Но в любом случае подобные исследования — потенциально богатый источник информации, касающейся физиологических основ познавательных способностей.

ПОЖИЗНЕННЫЕ эффекты раннего воздействия половых гормонов называют «организующими», так как они, по-видимому, изменяют функционирование мозга на всем протяжении критического периода развития человека. Введение тех же самых гормонов в более поздние периоды жизни таких эффектов не вызывает. Гормональные эффекты не ограничиваются только половым или репродуктивным поведением: судя по всему, они затрагивают все известные формы поведения, где мужчины и женщины обнаруживают различия. Эти эффекты, похоже, отражаются и на решении задач, агрессивности и склонности к играм с элементами драки, т. е. к грубым физическим контактам, на которые так охотно идут молодые самцы некоторых млекопитающих. Так, Майкл Минни из Университета Макгилла обнаружил, что дигидротестостерон, воздействуя на структуру мозга, называемую миндалиной, — но не на гипоталамус, — порождает у молодых самцов грызунов склонность к игровым дракам.

Установлено также, что самцы и самки крыс по-разному решают задачи. Как показала Кристина Уильямс из Бернард-Колледжа, самки крыс проявляют большую склонность к использованию наглядных ориентиров при выполнении заданий, связанных с пространственным обучением, — что, судя по всему, свойственно и женщинам. В опытах Уильямс самки крыс предпочтительнее использовали такие ориентиры, как висевшие на



УРОВЕНЬ ТЕСТОСТЕРОНА может влиять на выполнение некоторых тестов (примеры тестов см. на врезках на с. 74 и 75). Женщины с высоким уровнем тестостерона лучше справляются с пространственными заданиями (вверху), чем женщины с низким уровнем этого гормона; мужчины с низким уровнем тестостерона выполняют тест успешнее, чем мужчины с высоким уровнем. Низкий уровень тестостерона у мужчин коррелирует с более успешным выполнением теста для оценки способностей к математическим рассуждениям (в середине); у женщин такой связи не выявляется. Не обнаружено связи и между уровнем тестостерона и выполнением теста, в котором обычно преуспевают женщины (внизу).

нальные влияния в критический период развития, можно повлиять на эти особенности поведения. Лишение новорожденных самцов тестостерона путем кастрации или введение новорожденным самкам эстрогенов приводит в зрелом возрасте к полному изменению специфических для данного пола форм поведения на противоположные. (Как уже говорилось, эстрогены способны вызывать во время развития мозга маскулинизирующие эффекты.) Самки, которым вводятся эстрогены, ведут себя как самцы, а кастрированные самцы — как самки.

Эволюцию описанных различий в способах ориентирования можно объяснить естественным отбором репро-

дуктивных преимуществ. Как предположили Стивен Голин и Рэндалл Фитцджералд из Питтсбургского университета, у тех видов полевок, самцы которых спариваются не с одной, а с несколькими самками, путь, который нужно преодолеть перед спариванием, больше. А потому способности к ориентированию должны играть критическую роль для достижения самцом репродуктивного успеха. И в самом деле, Голин и Фитцджералд, изучая поведение полевок в лабораторном лабиринте, выявляли половые различия только у полигинных видов (например, у пашенной полевки), но не у моногамных (прерийной полевки).

Как уже говорилось, поведенческие различия могут отражать анатомические особенности полов. Лючия Джейкобз из лаборатории Голина обнаружила, что гиппокамп (у птиц и млекопитающих эта структура мозга, как полагают, участвует в пространственном обучении) у самцов полигинных полевок больше, чем у самок. Ничего, однако, нельзя пока сказать о возможных половых различиях в размерах гиппокампа у человека.

Свидетельства о влиянии половых гормонов на поведение взрослых людей носят гораздо более косвенный характер. При изучении человеческого поведения ученые руководствуются параллелями с другими видами и встречающимися время от времени исключениями из правила.

Одно из самых интересных направлений в этой области — изучение девочек, подвергавшихся чрезмерному воздействию андрогенов в пренатальной или неонатальной жизни. Избыточную выработку андрогенов надпочечниками может вызвать генетическое нарушение, известное под названием врожденной гиперплазии надпочечников (ВГН). До 1970-х годов аномально высокая секреция этого гормона внезапно возникала также у беременных женщин, принимавших различные синтетические стероиды. И хотя последующую маскулинизацию половых органов можно скорректировать в ранней жизни ребенка, а медикаментозная терапия помогает остановить избыточную секрецию андрогенов, эффекты их пренатального воздействия на мозг носят необратимый характер.

Анке Эрхардт из Колумбийского университета и Джун Райниш из Института Кинзи обнаружили, что девочки с избыточной секрецией андрогенов в ранней жизни, взрослея, проявляли более выраженное мальчишеское поведение и большую агрессивность, чем их сестры. Этот вывод основывался на собеседованиях с самими девочками и их матерями, оценках учителей и опросниках, заполнявшихся девочками. Если в подобных работах используются количественные оценки, не всегда удается избежать предвзятости во мнениях как взрослых людей, хорошо знающих ребенка, так и самих девочек.

Поэтому особого внимания и доверия заслуживают объективные наблюдения, сделанные Беренбаум. Она и Мелисса Хайнз из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе наблюдали поведение девочек с ВГН в играх и сравнивали его с поведением их братьев и сестер. Оказавшись перед богатым выбором игрушек (авто-

мобилей, конструкторов, кукол, наборов кухонной посуды, книг и настольных игр), девочки с ВГН отдавали предпочтение тем из них, которые обычно выбирают мальчики. Так, за игрой с автомобилями они проводили столько же времени, сколько обычно проводят нормальные мальчики. Выбор игрушек девочками с ВГН и мальчиками отличался от выбора игрушек девочками без ВГН в ранней жизни. Поскольку есть все основания думать, что родители поощряют женские склонности своих дочерей с ВГН не менее горячо, чем дочерей без ВГН, можно предполагать, что особенности предпочтений к игрушкам, выявленные у девочек с ВГН, и в самом деле каким-то образом связаны с ранней гормональной средой.

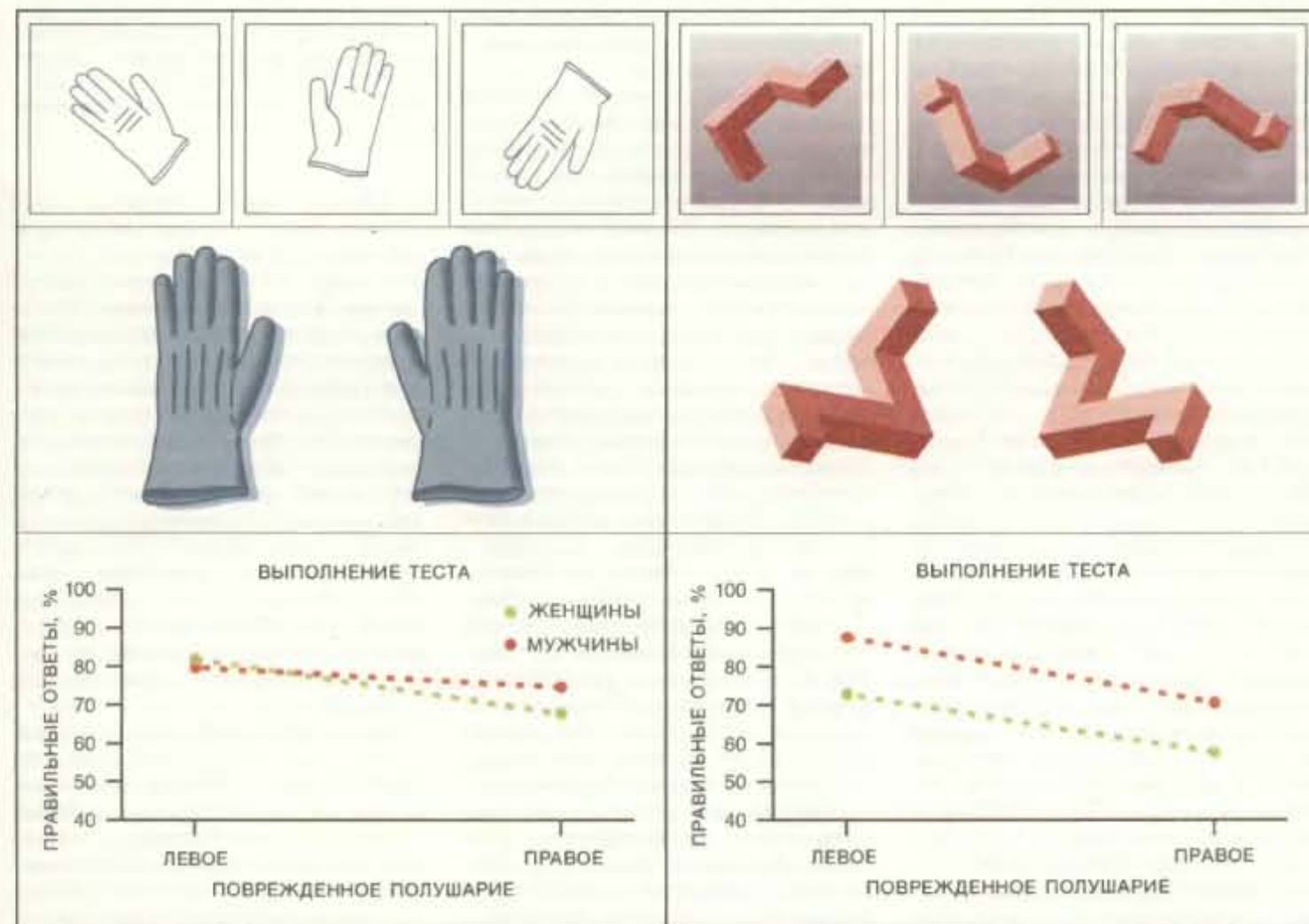
Пространственные функции, которые обычно лучше развиты у мужчин, у девочек с ВГН также более совершенны. По сообщениям Сюзан Резник, работающей в настоящее время в Национальном институте геронтоло-

гин, а также Беренбаум и ее коллег, девочки с ВГН лучше, чем их сестры, выполняли тест на пространственную манипуляцию, два теста на пространственное вращение предмета и тест на распознавание (выявление простой фигуры, «спрятанной» в более сложной). Все эти задания, как правило, лучше выполняют мальчики. Никаких различий в других перцептивных или вербальных тестах, а также в заданиях, требующих логических рассуждений, между двумя группами девочек выявлено не было.

ПОДОБНЫЕ исследования позволяют предположить, что чем выше уровень андрогенов, тем лучше выполнение пространственных тестов. Похоже, однако, что это не так. В 1983 г. Валерия Шут, работавшая в Калифорнийском университете в Санта-Барбара, высказала предположение, что связь между уровнем андрогенов и способностями человека к решению пространственных задач

может иметь нелинейный характер. Иными словами, эти способности с увеличением уровня андрогенов могут и не улучшаться. Шут измерила содержание андрогенов в крови студентов мужского и женского пола и разделила каждую из этих двух групп на две подгруппы испытуемых — с высоким и низким уровнем андрогенов. Данный показатель был у всех испытуемых в пределах нормы, характерной для данного пола (у женщин содержание андрогенов очень незначительно). Шут показала, что женщины с высоким содержанием андрогенов лучше справлялись с пространственными тестами. Среди мужчин картина была обратной: с пространственными тестами лучше справлялись испытуемые с низким содержанием андрогенов.

Недавно Катрин Гаучи и я провели похожее исследование, измеряя уровень тестостерона в слюне. Для оценки еще двух способностей (математических и быстроты восприятия) ис-



ПОВРЕЖДЕНИЕ ПРАВОГО ПОЛУШАРИЯ влияет на способности к решению пространственных задач у мужчин и женщин одинаково (графики внизу); это заставляет думать, что оба пола в равной мере используют это полушарие для решения некоторых пространственных тестов. В тесте на пространственное вращение (слева) перчатке для правой

руки нужно подобрать пару из серии рисунков, изображающих одетую в перчатку правую или левую руку. В другом тесте (справа) одному из двух зеркальных изображений одного и того же объекта нужно подобрать пару из серии его трехмерных изображений на фотографиях.

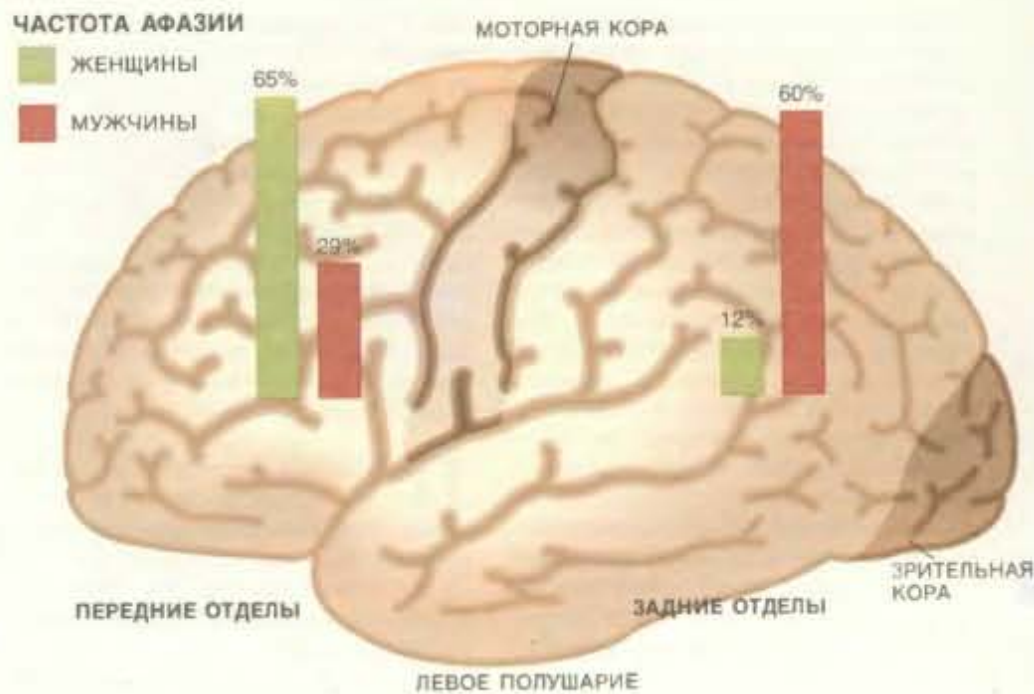
пользовались и другие тесты. Результаты, полученные нами в пространственных тестах, были очень близки к данным Шут: мужчины с низким уровнем тестостерона справлялись с этими тестами лучше, чем мужчины с высоким, а женщины с высоким уровнем тестостерона — лучше, чем с низким. Это обстоятельство может указывать на то, что существует, по-видимому, некий оптимальный уровень андрогенов в крови, определяющий максимальные способности к решению пространственных задач. Не исключено, что уровень этот соответствует низкому содержанию андрогенов у мужчин.

Не обнаружено корреляции между уровнем тестостерона и выполнением тестов для оценки быстроты восприятия. Результаты же, полученные у мужчин при оценке математических способностей, были близки к результатам в пространственных тестах: более высокие показатели имели мужчины с низким содержанием андрогенов; у женщин корреляция между этими показателями отсутствовала.

Полученные данные согласуются с тем, что предположила Камилла Бенбоу из Университета шт. Айова: высокие математические способности во многом определяются биологическими факторами. Бенбоу и ее коллеги сообщили о существовании стойких половых различий в способностях к математическим рассуждениям в пользу мужчин. Эти различия особенно сильно выражены на верхнем конце распределения, где на 13 «мужских» показателей приходится только один «женский». По мнению Бенбоу, социальными факторами эти различия так просто не объяснить.

Важно помнить, что выявленная связь между естественным уровнем гормонов и способностями к решению задач основана на корреляционных данных. Безусловно, между этими показателями существует и какая-то внутренняя зависимость, но пока не известно, чем она определяется и каковы ее причины. Плохо сегодня понятна и связь между уровнем гормонов в зрелом возрасте и в ранней жизни, когда, вероятно, в нервной системе и формируются способности. Механизмы, определяющие характер умственной деятельности у людей, тают в себе еще много секретов.

Оценивать различия между мужским и женским мозгом можно и по-другому — путем изучения и сравнения функций отдельных систем мозга. Одним из неинвазивных методов исследования здесь является наблюдение за людьми с повреждениями какой-либо определенной области мозга. Подобные исследования ука-



зывают на то, что у большинства людей критическим для речи является левая половина мозга, а для некоторых перцептивных и пространственных функций — правая.

Многие ученые, занимающиеся половыми различиями, разделяют мнение, что речь и пространственные функции представлены в полушариях мозга более асимметрично у мужчин, чем у женщин. Мнение это основано на целом ряде данных. Отдельные части мозолистого тела (главная нервная структура, соединяющая два полушария) могут достигать более значительного различия у женщин; перцептивные тесты, с помощью которых оценивается асимметрия мозга у здоровых людей, иногда позволяют выявить у женщин менее выраженную полушарную асимметрию, чем у мужчин; повреждение одного мозгового полушария иногда вызывает у женщин менее выраженные последствия, чем сравнимая травма у мужчин.

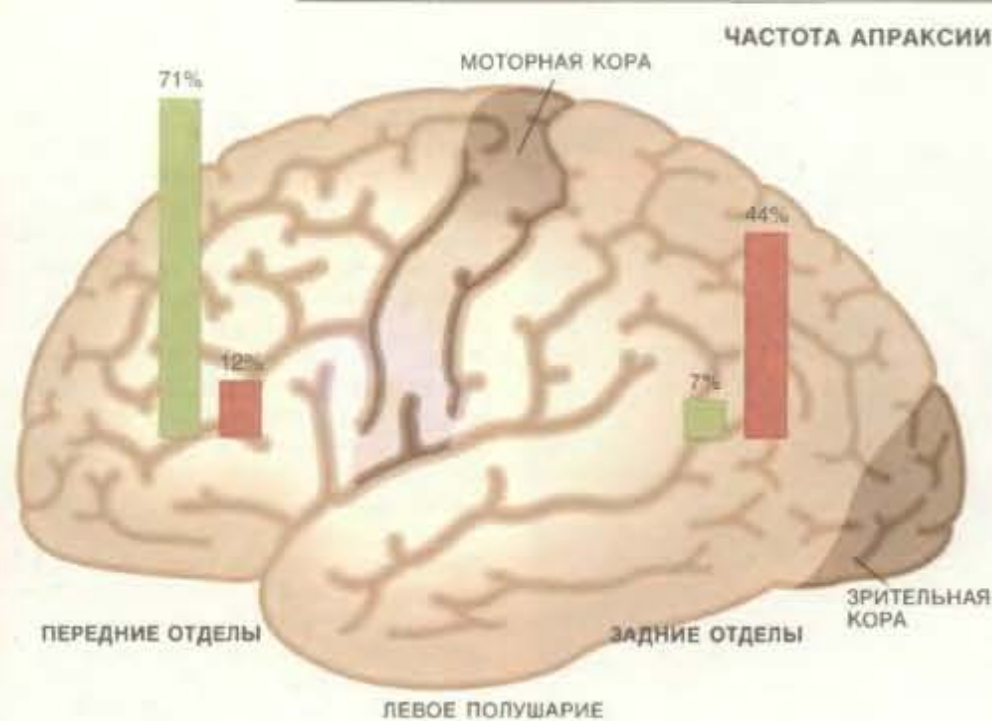
В 1982 г. Мария-Кристина де Лакост, работающая сейчас в Медицинской школе Йельского университета, и Ральф Холлоуэй из Колумбийского университета сообщили, что задняя часть мозолистого тела (так называемый валик) у женщин больше, чем у мужчин. Позднее это открытие и подтвердилось, и опровергалось. Причиной разногласий может быть форма мозолистого тела, которая иногда изменяется с возрастом человека, а также различия в методах измерения. Впоследствии Аллен и Горски выявили в размерах валика такие же половые различия.

Интерес к мозолистому телу объясняется тем, что его размеры могут отражать число нервных волокон, со-

единяющих полушария мозга. Если этих волокон больше у представителей какого-либо одного пола, значит полушария взаимодействуют у них полнее. Как показали Виктор Дененберг и его сотрудники из Коннектикутского университета, у крыс половые гормоны могут изменять размеры мозолистого тела. Не ясно пока, разное ли число нервных волокон имеется в мозолистом теле у животных разного пола. Кроме того, нужно еще доказать существование связи между половыми различиями когнитивных функций и различиями в размерах мозолистого тела. Новые методы, позволяющие получать изображения головного мозга живых людей, безусловно, обогатят наши знания в этой области.

Мнение о большей функциональной асимметрии мужского мозга бытует давно. Альберт Галаурда из Больницы Бет-Изразль в Бостоне и ныне покойный Норман Гешвинд из Медицинской школы Гарвардского университета предположили, что андрогены усиливают функционирование правого полушария. В 1981 г. Марлан Даймонд из Калифорнийского университета в Беркли показала, что у самцов крыс, в отличие от самок, кора правого полушария толще, чем левого. Джейн Стюарт из Университета Конкордия в Монреале в совместной ра-

боте с Брайаном Колбом из Университета Летбриджа в провинции Альберта (Канада) сообщили недавно о ранних гормональных влияниях на эту асимметрию: судя по всему, андрогены подавляют рост коры левого полушария мозга. В прошлом году де Лакост и ее коллеги наблюдали похожую картину у человека: в эмбриональный период у будущих мальчиков кора правого полушария толще, чем левого. Таким образом, есть, по-видимому, анатомические основания утверждать, что полушарная асимметрия выражена у мужчин и женщин неодинаково.



АПРАКСИЯ, или нарушение выбора надлежащих движений руки, связана с повреждением передних отделов левого полушария у женщин и задних отделов у мужчин. Апраксия сопровождается также нарушением организации речи.

Но, вопреки ожиданиям, свидетельства в пользу этого предположения скудны и противоречивы, а это говорит о том, что наиболее выраженные половые различия в организации мозга могут и не быть связаны с его асимметрией. Так, если бы общие различия способностей мужчин и женщин к выполнению пространственных тестов были связаны с разной представленностью у них этих функций в правом полушарии, то его повреждение, очевидно, должно было бы вызывать более сильное нарушение пространственного поведения у мужчин.

У нас в лаборатории недавно изучалась способность людей с повреждением одного полушария мыслен-

но вращать предметы. В одном из тестов испытуемым предъявлялась серия очертаний по-разному ориентированной правой или левой руки в перчатке. В ответ на просьбу определить, какой из двух лежащих тут же перчаток соответствует то или иное очертание, испытуемые просто указывали на одну из них.

В другом тесте использовались две трехмерные фигуры из кубиков, являвшиеся зеркальным отражением друг друга. В течение всего теста обе фигуры находились перед испытуемым. Ему давали серию фотографий этих фигур в различных ориентациях и предлагали положить каждую фотографию перед той фигурой, которую она изображает. (Подобные невербальные тесты позволяют изучать и больных с расстройствами речи.)

Как и ожидалось, лица обоего пола с поврежденным правым полушарием имели более низкие показатели, чем с поврежденным левым, а женщины хуже мужчин справлялись с тестом пространственного вращения фигуры из кубиков. Но к удивлению, повреждение правого полушария не вызывало ничуть не меньшие нарушения, чем у мужчин. А это указывает на то, что нормальные различия между мужчинами и женщинами в таких тестах на пространственное вращение обусловлены не половыми функциональными различиями правого полушария. Какие-то другие системы мозга должны отвечать за более высокие способности мужчин в этом плане.

Сходное предположение о более выраженной асимметрии мозга у

мужчин в отношении речи основывалось на том факте, что после травмы левого полушария афазия (расстройство речи) встречается среди мужчин чаще, чем среди женщин. На этом основании некоторые ученые поспешили заключить, что у женщин оба полушария принимают в организации речи большее участие, чем у мужчин. Но и этот вывод наталкивается на некоторые противоречия. Мой 20-летний опыт работы с больными позволяет утверждать, что среди женщин с повреждением правого полушария афазия встречается столь же часто, как и среди мужчин с аналогичной травмой.

Пытаясь найти объяснение этому обстоятельству, я обнаружила еще одно поразительное различие в локализации в головном мозге мужчин и женщин центров, обеспечивающих речь и связанные с ней двигательные функции. После повреждения лобной части мозга афазия развивается у женщин чаще, чем у мужчин. Поскольку локальные повреждения полушарий и у мужчин, и у женщин чаще возникают в задних, а не в передних отделах мозга, можно думать, что именно этим обстоятельством и объясняется тот факт, что женщины подвержены афазии в меньшей степени, чем мужчины. Таким образом, речевые функции страдают у женщин реже не потому, что у них сильнее выражена их двухсторонняя организация, а из-за того, что реже подвергается повреждению критическая в этом плане зона мозга.

Такая же картина наблюдается и при изучении контроля за движениями руки, которые программируются левым полушарием. Апраксия, или расстройство выбора надлежащих движений руки, — весьма обычное нарушение после повреждения левого полушария. Тесно связано оно и с нарушением организации речи. По сути дела, те критические функции, которые зависят от целостности левого полушария, могут быть связаны не с речью как таковой, а с организацией сложных движений рта и рук, участвующих в общении людей. Как показало изучение больных с поврежденным левым полушарием, такая система выбора моторики представлена у женщин в передних, а у мужчин — в задних отделах полушария.

У женщин топографическая близость передней системы выбора моторики (или «системы праксиса») к расположенной сразу же позади нее моторной коре может способствовать развитию тонких двигательных навыков. Напротив, у мужчин организация системы двигательных навыков способствует совершенствованию

движений, связанных с прицеливанием и направленных во внешнее пространство, т. е. на объекты, находящиеся от человека на некотором расстоянии. Эти навыки могут получить преимущества в тех ситуациях, когда необходимо их тесное взаимодействие со зрительным входом, который локализован в задних участках полушарий.

Передняя локализация системы выбора моторики у женщин выявляется даже в тестах, требующих зрительного контроля (например, когда испытуемый должен построить из кубиков фигуры по зрительной модели). Изучая выполнение испытуемыми этого сложного задания, можно сравнивать последствия травмы передних и задних отделов обоих полушарий, так как на поведение человека влияют повреждения в каждом из них. И в этих тестах женщины обнаруживают большую выраженность нарушений при повреждении передних, нежели задних отделов правого полушария. У мужчин, как правило, наблюдается обратная картина.

Хотя мне и не удалось выявить признаки половых различий в функциональной асимметрии мозга в отношении речи, выбора моторики или способности к пространственному вращению, кое-какие различия я обнаружила при выполнении испытуемыми более абстрактных вербальных заданий. Так, на показатели в тестах для оценки словарного запаса у женщин влияли повреждения обоих полушарий, а у мужчин — только левого. Этот факт заставляет думать, что при осмыслении слов женщины используют оба полушария в большей степени, чем мужчины.

Напротив, среди мужчин чаще, чем среди женщин, встречаются левши, что, возможно, связано с меньшей зависимостью у первых двигательных навыков от левого полушария. Марион Аннетт, ныне работающая в Лестерском университете (Великобритания), сообщила, что даже среди правшей женщины отличаются большей праворукостью, чем мужчины, т. е. они чаще, чем правши-мужчины, предпочитают пользоваться правой рукой. А значит, не исключено, что половые различия в асимметрии представленности разных функций в полушариях мозга варьируют и что, стало быть, не всегда более «асимметричным» является какой-то один пол.

Таким образом, в целом полученные данные свидетельствуют о том, что с самого раннего возраста организация головного мозга у мужчин и женщин идет по-разному. В течение всего развития организма эту дифференцировку направляют половые гормоны. Поскольку между уровнем не-

которых гормонов и когнитивными способностями человека в зрелости существует связь, аналогичные механизмы, по-видимому, ответственные и за формирование различий между представителями одного пола.

ЛЮБОПЫТНЕЕ всего, что когнитивные реакции могут сохранять чувствительность к флуктуациям уровня гормонов на протяжении всей человеческой жизни. Элизабет Хампсон из Университета Западного Онтарио показала, что выполнение женщинами некоторых тестов изменялось в течение менструального цикла в зависимости от увеличения или падения уровня эстрогенов. Высокий уровень этих гормонов коррелировал с относительным ухудшением пространственных способностей и улучшением артикуляционных и двигательных навыков.

У мужчин я наблюдала сезонные колебания способностей к решению пространственных задач. Весной, когда уровень тестостерона ниже, мужчины показывают лучшие результаты. Но неясно, имеют ли колебания интеллектуальных способностей какую-либо адаптивную значимость, или же это просто временные отклонения от стабильного фона.

Чтобы понять интеллектуальные функции человека и причины их различий у представителей разных социальных групп, нужно разобраться в том, что скрыто за требованиями современной жизни. Наши способности к чтению или работе с компьютером естественному отбору не подвергались. Ясно, что половые различия в характере умственной деятельности возникли потому, что они были эволюционно выгодными и что их адаптивная значимость, возможно, осталась в далеком прошлом. Организация человеческого мозга на протяжении многих поколений определялась естественным отбором. Как показало изучение ископаемых черепов, наш мозг в общем остался таким же, каким он был у наших предков 50 или более тысяч лет назад.

На протяжении тех многих тысячелетий, когда шла эволюция человеческого мозга, люди жили сравнительно небольшими группами охотников

и собирателей. В таком обществе, возможно, было сильно выражено разделение труда между полами (что отмечается и в ныне существующих сообществах охотников и собирателей). Мужчины занимались охотой на крупную дичь, часто требовавшей длинных путешествий. Они также отвечали за защиту группы от хищников и врагов, за изготовление и использование оружия. Женщины, всего вероятнее, собирали пищу вблизи стоянки, заботились о жилище, готовили еду, одевали и кормили детей.

Вследствие такой специализации мужчины и женщины должны были подвергаться разному давлению естественного отбора. Мужчинам требовалась способность определять маршрут во время длинных переходов и распознавать географические ориентиры с разных местоположений. Нужна была им и точность прицеливания. Женщинам требовались способности к ориентированию на короткие расстояния и, возможно, умение пользоваться при этом «наглядными» ориентирами местности; тонкие двигательные навыки, которые они могли бы проявить на ограниченной территории стоянки, и способность к перцептивному различению, чувствительному к незначительным изменениям окружающих обстоятельств, внешнего облика детей или их поведения.

Наличие стойких, а иногда и достаточно резких половых различий заставляет думать, что мужчины и женщины должны обладать разными «профессиональными» интересами и способностями, не зависящими от влияния общества. Поэтому, например, не следует ожидать, что мужчины и женщины непременно будут представлены одинаково в тех областях деятельности, где требуются хорошие пространственные или математические навыки (техника, физика). Но я ожидаю увеличения числа женщин в области медицинской диагностики, где очень важны перцептивные способности. Даже хотя у иных людей и есть все необходимые данные, чтобы работать в нетипичной для их пола области, в целом соотношение полов в них может измениться.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

Диагноз по ДНК

ОТВЕТЫ на вечные вопросы о причинах того или иного заболевания состоят всего из четырех букв. Гены, «инструктирующие» клетку, как выполнять жизненно важные функ-

ции (или не делающие этого), представляют собой цепочки из нуклеотидов, различающихся по входящему в их состав азотистому основанию — это может быть гуанин (G), цитозин (C), аденин (A) либо тимин (T). Простая замена T на A в определенном

гене, например, приводит к серповидноклеточной анемии. Недавно продемонстрирована связь некоторых тяжелых раковых заболеваний с изменениями в гене, называемом *p53*.

Процесс выяснения связи между генетическими отклонениями и болезнями значительно упростился благодаря автоматике. Многие в области совершенствования оборудования для научных исследований делается благодаря правительственным ассигнованиям в рамках международного проекта «Геном человека». Сейчас к этому направлению растет и коммерческий интерес. Методы секвенирования (определения последовательности оснований) ДНК обещают стать могучим инструментом клинической диагностики. «Мы хотим выпускать продукцию для врачей, а не для тех, кто работает в лабораториях», — заявляет Дж. Бриггз, директор компании Affymetrics (недавно возникшего филиала биотехнологической фирмы Affymax Research в Пало-Альто, шт. Калифорния), ответственный за производственную деятельность.

«Врачи и ученые используют технологию секвенирования ДНК для разработки важных клинических тестов», — замечает М. Ханкапиллер, исполнительный вице-президент компании Applied Biosystems, Inc. (ABI) в Фостер-Сити (шт. Калифорния). Она выпустила первый автоматический секвенатор ДНК и до сих пор остается ведущим поставщиком систем, расщепляющих ДНК, присоединяющих флуоресцентную метку к каждому азотистому основанию и вновь собирающих их последовательность. Оптическое читающее устройство вводит сигналы в компьютер, регистрирующий порядок оснований.

Р. Гиббз, возглавляющий центр секвенирования ДНК в Медицинском колледже Бейлора, использует этот флуоресцентный метод для обследования семей, подозреваемых в носительстве одной из более 100 мутаций, вызывающих муковисцидоз. «Мы не просто выясняем, работает ген или нет, — подчеркивает он, — а интересуемся, в чем отличие ДНК больного от нормы».

Гиббз и другие применяют тот же подход для сравнения ДНК различных штаммов вируса, вызывающего СПИД, «чтобы знать, кто, когда и от кого заразился». По его мнению, такая генетическая эпидемиология может оказаться полезной для лечения больных, если удастся обнаружить, какие последовательности ДНК связаны с устойчивостью вируса к лекарствам.

Однако данные, получаемые с помощью доступных в настоящее время систем секвенирования, пока требуют



КЕННЕТ Л. БИТТИ держит в руках опытный образец «геномного сенсора», разработанного в Хьюстонском центре перспективных исследований. С помощью таких компьютерных кристаллов, несущих на своей поверхности множество фрагментов ДНК, можно быстро определить, есть ли у индивида гены, связанные с какой-либо болезнью. (Фотография: Dan Ford Connolly/Picture Group.)

внимания высококвалифицированных специалистов для интерпретации компьютерных расчетов. Установление последовательности оснований в гене вроде того, что вызывает муковисцидоз, может занять несколько недель. Поэтому исследователи из ABI, Калифорнийского технологического института и других организаций стараются разработать алгоритмы, позволяющие компьютерам ставить надежный диагноз без участия человека.

Один из многообещающих подходов к автоматизированной диагностике основан на использовании компьютерных кристаллов, способных непосредственно определять aberrантные гены. За разработку таких кристаллов взялись несколько исследовательских групп, включая Хьюстонский центр перспективных исследований (HARC) в Те-Вуллендсе (шт. Техас) и фирму Affymetrics. Фрагменты ДНК длиной 8 оснований прикрепляются к поверхности кристалла и инкубируются с образцом ДНК пациента. Комплементарные последовательности этих двух ДНК гибридизуются на кристалле, давая картину, позволяющую судить, соответствует ли ДНК пациента нормальному или же мутантному гену.

«Наш подход мы называем технологией геномных сенсоров», — говорит К. Битти, руководящий Лабораторией технологии ДНК в HARC. Главное в методе диагностики, разработанном его группой, заключается в использовании высокочувствительной системы, способной улавливать изменения электрических свойств кристалла при гибридизации ДНК. В компьютере хранится информация о последовательности и положении

каждого фрагмента ДНК длиной 8 оснований на поверхности кристалла, так что любое изменение электрического заряда на данном его участке быстро преобразуется и считывается как последовательность оснований.

Планируется иммобилизовать на кристалле наборы отрезков ДНК, достаточные для анализа образцов генетического материала сразу нескольких больных или же полного генома индивида. «Когда плотность ДНК на кристалле увеличится, расчеты усложнятся», — говорит М. Эггерз, ответственный за изготовление кристаллов в HARC. Однако, как он полагает, информация в виде электрических сигналов вводить в отдельный компьютер не понадобится, поскольку миниатюрный микропроцессор будет находиться непосредственно на кристалле.

Бриггз уверен, что с разработкой простых методов диагностики ДНК возникнет рынок методов генетического обследования, которого пока нет. Но определяться это будет тем, насколько используемые системы способны давать не прогностическую, а полезную для практического лечения информацию. Разработчики новых методов диагностики ДНК отдают себе отчет в том, что управление по контролю качества пищевых продуктов, медикаментов и косметических средств США (FDA) уделяет внимание скорее тестам, пригодным для коммерческих, а не чисто научных целей. Если общественность и компании, занимающиеся медицинским страхованием, обретут, паче чаяния, более ясный взгляд на будущее, конгресс наверняка не оставит без внимания новые подходы в диагностике.

Дебора Эрикссон



Важнейшие психические расстройства и мозг

Шизофрения и маниакально-депрессивный психоз — наследственные заболевания, сопровождающиеся структурными и биохимическими изменениями в головном мозге. Гены, определяющие предрасположенность к ним, остаются неизвестными

ЭЛЛИОТ С. ГЕРШОН, РОНАЛД О. РИДЕР

С ДАВНИХ времен религия и поэзия усматривают причину безумия в поражении духа, а медицина — в ухудшении состава различных жидкостей и функционирования органов организма человека. В прошлом веке врачи пришли к заключению, что все наиболее обычные формы психозов (современный синоним безумия) можно причислить к одному из двух хронических заболеваний — шизофрении и маниакально-депрессивному расстройству, и приступили к изучению сопровождающих их нарушений в структуре и функциях мозга. От каждой из этих болезней страдает около 1% населения. Течение обеих характеризуется приступами, но если состояние больного при шизофрении неуклонно ухудшается, то пациенты с маниакально-депрессивным психозом, испытывающие чередование маниакальных и депрессивных состояний, в промежутках между ними остаются психически нормальными людьми.

В настоящее время выявлены анатомические, биохимические и наследственные основы этих болезней. Намечались пути поиска новых методов лечения. Этим проблемам и посвящена данная статья. Однако сначала полезно ознакомиться с тем, как проявляются такие заболевания.

У миссис Т. первый симптом шизофрении — глубокое убеждение, что все на нее «пялятся», возник в 16 лет. Вскоре такие «приступы» самосознания заставили ее прекратить фортепьянные выступления на публике. Обостренное самосознание сначала вызывало уход в себя, потом — мучительную манию, что все вокруг говорят только о ней; в конце концов появилось подозрение, что все хотят причинить ей вред. Сначала болезнь у миссис Т. носила перемежающийся характер, и возвращение умственных способностей, сердечности и целеустремленности между приступами позволило ей закончить колледж, выйти замуж и родить троих детей. Но в 28 лет, после рождения третьего ребенка, у нее начались галлюцинации и она была вынуждена лечь в больницу.

Теперь, когда миссис Т. 45 лет, болезнь никогда ее не покидает. На улицах она видит динозавров, а в холодильнике — живых животных. Во время галлюцинаций она говорит и пишет бессвязно, хотя довольно поэтично.

ГАЛЛЮЦИНАТОРНЫЙ АВТОПОРТРЕТ — плод специфического воображения, иногда наблюдаемого у больных шизофренией; портрет передает и страдания человека, и присутствие шизофрении искаженное восприятие.

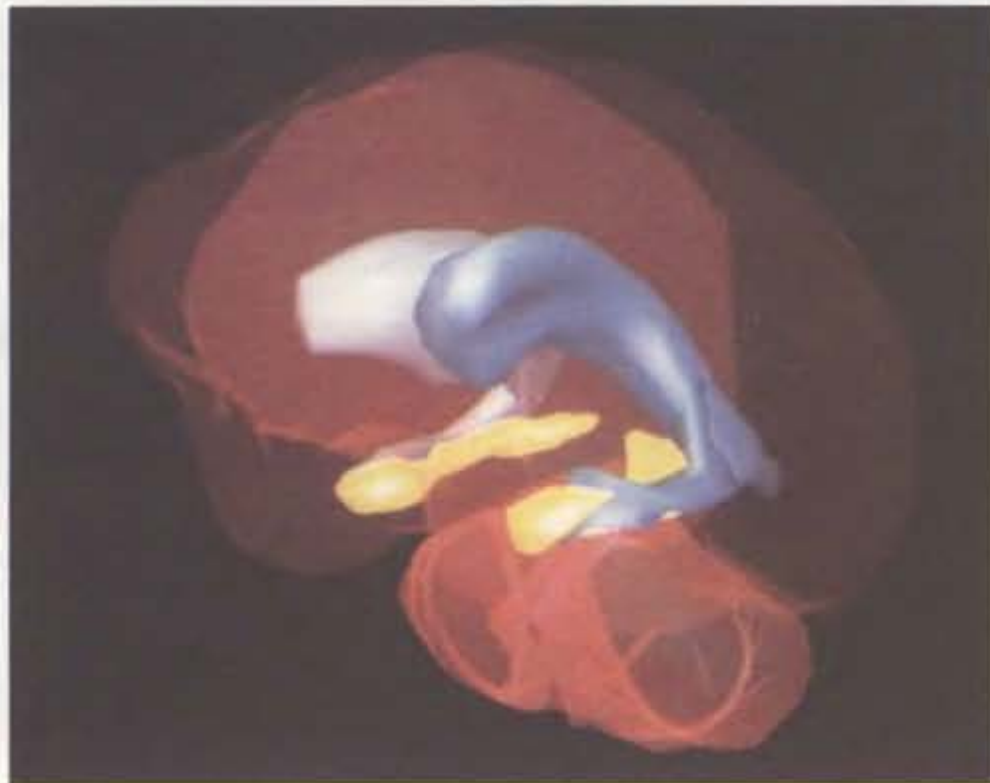
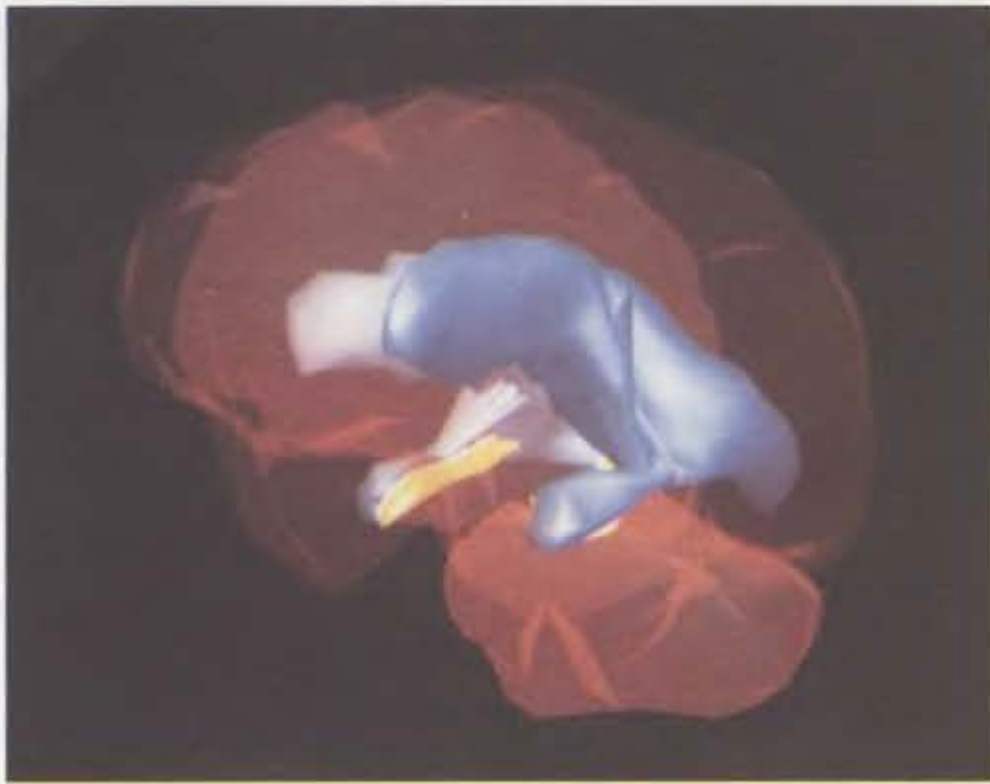


В остальное время сознание ее более ясное, но даже и тогда какие-то «голоса» иногда толкают ее на опасные поступки, например на очень быструю езду по автостраде среди ночи в одной ночной рубашке. Когда такие эпизоды завершаются, миссис Т. обычно впадает в глубокую депрессию и остро переживает безнадежность своего состояния. Часто, включив зажигание, она остается в автомобиле и думает о самоубийстве.

Последние пять лет она принимала антипсихотические препараты, такие, как галоперидол, которые подавляли галлюцинации и позволяли ей избежать больницы. Стресс, однако, способен на несколько дней или недель вернуть галлюцинации и бред, как, например, после ее недавнего разрыва с мужем и продажи дома. В таких ситуациях «голоса» подвергают ее уничтожающей критике. После отъезда дочери в колледж они кричали ей: «Никогда ты ее больше не увидишь; ты была плохой матерью, и она умрет!» В другой раз у миссис Т. без всякой видимой причины начались причудливые зрительные галлюцинации. Так, она видела херувимов в бакалейной лавке. После таких случаев она испытывает глубокую озабоченность, растерянность, страх и не может заняться повседневными делами — стиркой или игрой на пианино. Но, когда она чувствует себя лучше, она добровольно идет работать в церковь.

ПСИХИЧЕСКИЕ расстройства, отличные от шизофрении, называют униполярными, если у пациента возникают только эпизоды депрессии, и биполярными, если депрессивные состояния чередуются с маниакальными. (Термин «маниакально-депрессивный психоз» включает как униполярную, так и биполярную форму; термин «биполярный» используется и в тех редких случаях, когда у больного возникают только маниакальные состояния.) Депрессии могут протекать очень тяжело и часто завершаются самоубийством. Маниакальное состояние обычно характеризуется возбуждением и импульсивным поведением; в отсутствие лечения оно может разрушить благополучие человека, его брак и карьеру.

Как показывает пример, описанный группой психиатров под руководством Р. Спитцера из Колумбийского университета, маниакальные состояния могут развиваться внезапно и нередко сопровождаются скандалами. Дэрил, 25-летний тансор, получил роль в шоу на Бродвее. Возвращаясь домой после репетиций, он все чаще стал пренебрежительно отзываться и о самих репетициях, и о режиссере



СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ в мозге при шизофрении (вверху) связаны с уменьшением размеров гиппокампа (желтый) и увеличением объема заполненных жидкостью желудочков (серые); для сравнения изображен мозг здорового человека (внизу). Эти трехмерные ЯМР-изображения получены Н. Андреасен из Университета шт. Айовы.

представления. Через неделю жене Дэрида позвонил один из исполнителей и пожаловался на то, что ее муж пытается доминировать на репетициях, подавая режиссеру и другим исполнителям неуместные советы. В это время жена Дэрида тоже поняла, что ее муж из веселого, добродушного человека превратился в напряжен-

ного, раздражительного. Он начал делать непристойные замечания по поводу фигуры жены и их половой жизни. Через три дня, когда он разразился непотребной бранью в адрес других исполнителей, его выгнали с репетиции. Дома он принялся безостановочно расхаживать в одном нижнем белье и о чем-то тараторить.

Ни есть, ни спать ему не хотелось. На следующий день он не пошел на работу, сделав себе несколько экстравагантных покупок.

Через две недели после возникновения первых симптомов Дэрида был госпитализирован. Он принял одну дозу транквилизатора, но большую часть ночи занимался тем, что не давал спать другим больным в палате. На следующее утро, вопреки рекомендациям врача, он выписался из больницы. Со временем ему стал помогать карбонат лития. У отца Дэрида похожая, но более длительная болезнь, в течение 20 лет он много раз терял работу из-за столкновений с начальством. Однако последние пять лет ему также помогает литий.

Хотя шизофрения и маниакально-депрессивный психоз могут сильно осложнить жизнь человека, они не мешают заниматься творческой деятельностью. Известны случаи, когда больные шизофренией в условиях ограниченной свободы медицинского учреждения создавали выдающиеся произведения искусства (см. рисунок на с. 82). Маниакально-депрессивный психоз часто встречается у людей одаренных, талантливых или даже у гениальных в самых разных областях деятельности — политике, военном деле, литературе, музыке, исполнительском искусстве. Среди тех, кто, как полагают, страдал этими расстройствами, можно назвать Уильяма Блейка, лорда Байрона, Вирджинию Вулф, Роберта Шумана, Оливера Кромвеля и Уинстона Черчилля. Многие исследователи считают, что смена крайних настроений, а вместе с ними — и отношения к действительности, стимулирует творческие способности человека. Источником творческих сил может быть сила и глубина мысли, которые обычно характерны для легких форм маниакальных состояний.

ХОТЯ шизофрения и другие тяжелые психические расстройства проявляются в виде душевных переживаний, во многом они детерминированы биологически. (В данной статье рассмотрены лишь некоторые биологические открытия в этой области.) Первое свидетельство о таких детерминантах относится к началу века, когда в результате генетических исследований было установлено, что и шизофрения, и маниакально-депрессивный психоз — заболевания семейные. Большинство психиатров, однако, этим обстоятельством пренебрегали, поскольку члены одной семьи, как правило, не только обладают одинаковыми генами, но и испытывают воздействие одной и той же

окружающей среды. Чтобы изучить эти два фактора отдельно, ученые стали обследовать приемных детей, которые в новой семье оказываются под влиянием внешней среды, отличной от той, что была в их генетической семье.

В самом известном из таких исследований, начатом в 60-х годах С. Кети и его коллегами из Национального института психического здоровья (США) и одного из психологических институтов в Скандинавии, были выявлены усыновленные в детстве шизофреники, и на основании регистрационных записей прослеживалось состояние здоровья их биологических родственников. Биологические родственники шизофреников отличались повышенным риском этого заболевания, а приемные — нет. В контрольной группе людей — биологических родственников психически здоровых приемных — повышенного риска шизофрении или какого-либо иного, сходного с ней заболевания, выявлено не было.

Показательны в этом плане и исследования близнецов, поскольку по своему генетическому родству разные типы близнецов сильно варьируют. Если у одного близнеца развивается шизофрения или биполярное расстройство, вероятность, что ими заболеет другой близнец, гораздо выше у однояйцовых (идентичных) близнецов, у которых все гены одинаковы, чем у разнояйцовых, у которых одинакова примерно половина генов. Кроме того, хотя примерно у половины однояйцовых близнецов, родившихся от шизофреников, болезнь никогда и не развивается, дети таких «благополучных» близнецов отличаются повышенным риском шизофрении. Эти факты позволяют сделать два вывода. Риск заболевания повышается с увеличением генетической близости, но даже абсолютная идентичность генов не предполагает обязательного развития болезни. Следовательно, преодолеть «порог» заболевания предрасположенных к нему людей заставляют какие-то внешние факторы или их взаимодействие с генами. Один из возможных факторов уже установлен: пренатальное воздействие вируса гриппа.

Психические расстройства развиваются также в результате взаимодействия генов с теми или иными факторами окружающей среды. С 40-х годов в ряде развитых стран отмечается стойкое увеличение частоты глубокой депрессии во всех возрастных группах. Эту тенденцию впервые выявило одно эпидемиологическое исследование, проведенное примерно 10 лет назад в Швеции. Аналогичное

возрастание частоты самоубийств наблюдалось за эти же 40 лет в провинции Альберта (Канада). Было установлено, что эти экзессы тесно связаны с годом рождения людей: так, частота самоубийств среди 15—19-летних была в 10 раз выше в группе родившихся в конце 50-х годов, чем в группе тех, кто родился в начале 30-х годов. В этот же период происходил и связанный с годом рождения рост частоты самоубийств, униполярного и биполярного расстройств, а также мужского алкоголизма в США и рост частоты биполярного расстройства в Швейцарии (см. рисунок на с. 87).

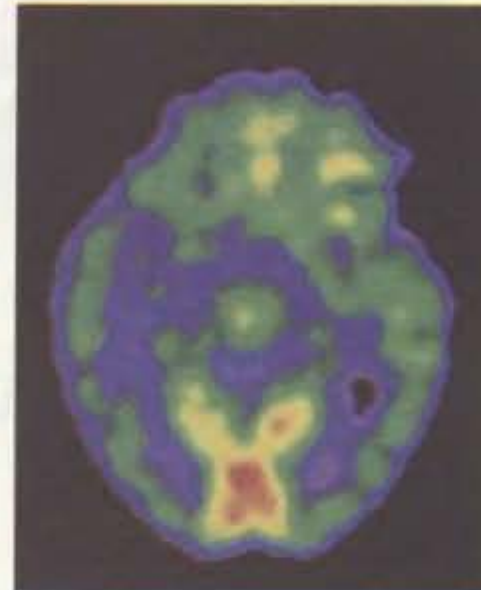
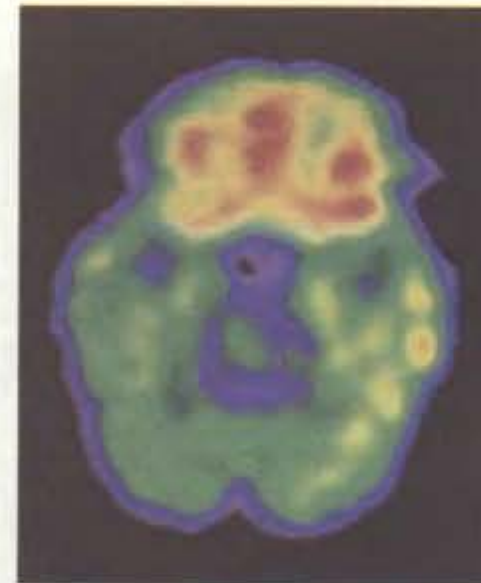
Частота депрессии, маниакальных состояний и самоубийств продолжает расти по мере того как взрослеет новое поколение людей, — тенденция, таящая в себе зловещие последствия для общественного здоровья. Среди родственников больных людей эти эффекты, связанные с годом рождения, выражены еще сильнее, чем среди населения в целом. В соответствующем возрасте дети больных людей гораздо сильнее подвержены этим расстройствам, чем братья и сестры их больных родителей. Эта связь явно указывает на взаимодействие генов с каким-то фактором окружающей среды, который на протяжении последних нескольких десятилетий должен был постоянно изменяться. Фактор этот до сих пор остается загадкой.

Те биологические аномалии, которые каким-то образом вызываются генами и внешними факторами, оставались тайной вплоть до 70-х годов, когда появились новые методы получения изображений, позволившие врачам рассмотреть живой мозг человека во всех деталях.

В 1978 г. Ева Джонстон и ее коллеги из Центра клинических исследований в Миддлсексе (Великобритания) впервые использовали один из таких методов — компьютерную томографию, или компьютерное томографическое сканирование — для изучения мозга больных шизофренией. Было обнаружено, что у шизофреников боковые мозговые желудочки гораздо больше, чем у здоровых людей. Если желудочки или пространства между извилинами у человека увеличены, мозговая ткань у него может быть недоразвита или утрачена. Этот вывод подтвердили и рентгеновские исследования, показавшие, что у шизофреников в области извилин коры мозга меньше нервной ткани и больше пространств, заполненных жидкостью.

УВЕЛИЧЕНИЕ объема желудочков мозга у шизофреников подтвердили и изображения, полученные с по-

мощью метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Группа исследователей под руководством Д. Вайнбергера из Национального института психического здоровья воспользовалась ЯМР для сравнения однояйцовых близнецов, один из которых страдал шизофренией, а другой — нет. Расширение желудочков у близнеца-шизофреника отмечалось в 12 из 15 обследованных пар близнецов. При аутопсии и ЯМР-сканировании мозга у больных шизофренией обнаружено также относительное уменьшение размеров специфических структур мозга. В наибольшей степени такое

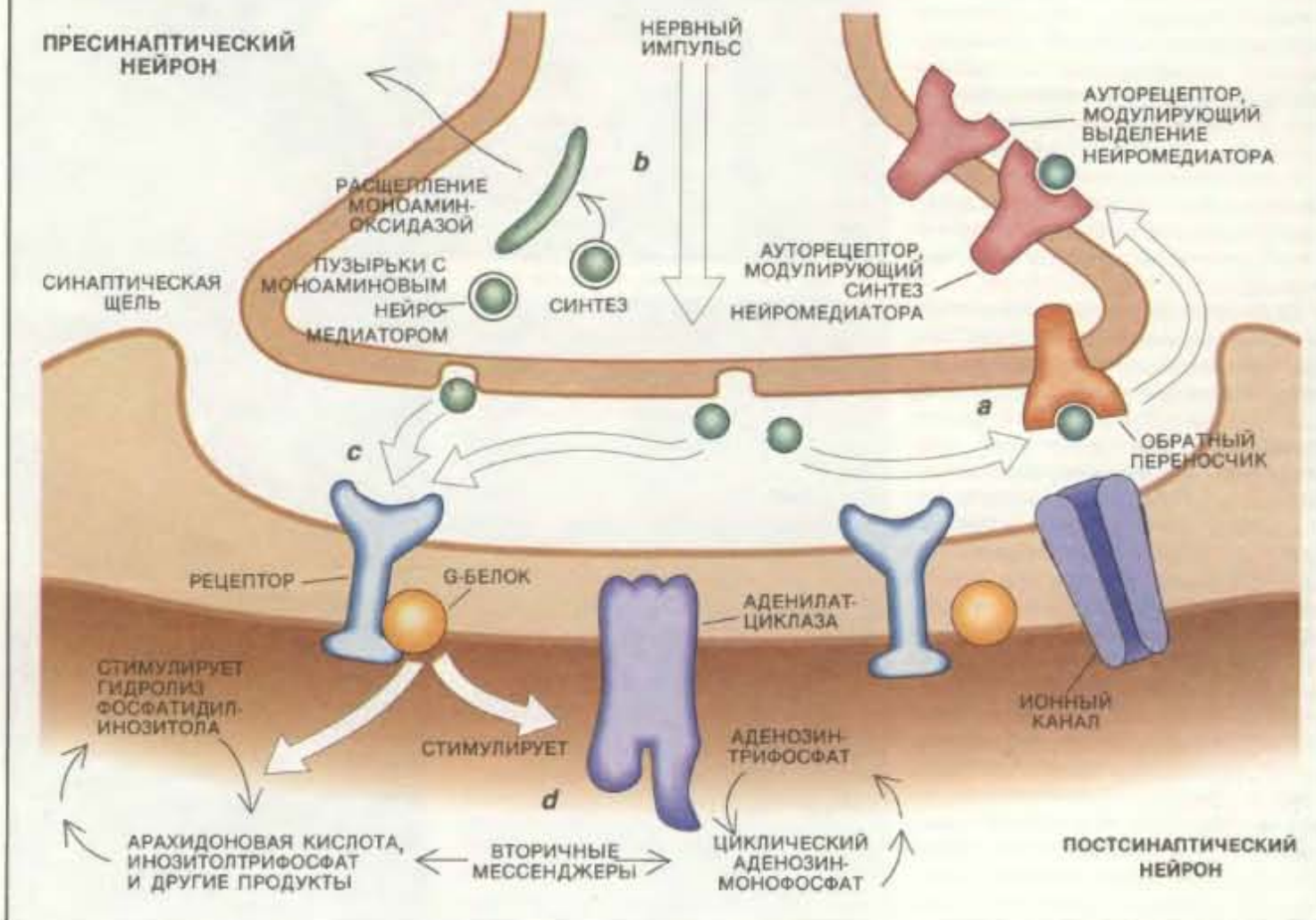


ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РАССТРОЙСТВА при шизофрении выявляются на позитрон-эмиссионных томограммах, полученных во время выполнения испытуемыми теста на внимание. Этот тест активирует метаболизм в префронтальной коре у здоровых людей (вверху), но не у больных шизофренией (внизу). Данные предоставлены М. Бухсбаумом из Калифорнийского университета в Ирвине.

Препараты для лечения психических заболеваний

Лекарства могут действовать на разные участки сигнала. К антидепрессантам, действующим на пресинаптический нейрон, относятся препараты, которые блокируют обратное поглощение моноаминов клеткой (а). В эту группу входят антидепрессанты (например, имипрамин, который блокирует обратное поглощение некоторых моноаминов) и блокаторы более специфического действия (например, флуоксетин, блокирующий обратное поглощение серотонина, и бупроприон для дофамина). Остальные антидепрессанты составляют группу так называемых ингибиторов моноаминоксидазы (b), которые подавляют метаболизм моноаминов пресинаптической клетки. К препаратам, действующим на постсинаптический нейрон, относятся

агенты, которые либо блокируют рецепторы, либо стимулируют их реактивность (с). Антипсихотический препарат галоперидол является блокатором дофаминовых рецепторов. Наконец, некоторые препараты действуют на вторичный мессенджер (d), который в норме образуется после активации рецептора. Так, карбонат лития, используемый против депрессии и маниакального синдрома, подавляет синтез фосфатидилинозитола. На рисунке изображен постсинаптический рецептор, связанный со стимуляторным G-белком; когда рецептор находится в таком активированном состоянии, синтез вторичных мессенджеров усиливается, что инициирует молекулярный каскад, определяющий характер реакций постсинаптического нейрона.



уменьшение было выражено в области гиппокампа — части лимбической системы в височной доле мозга, которая участвует в эмоциональных реакциях, памяти и других функциях (см. рисунок на с. 84).

С помощью новых методов сканирования мозга впервые были продемонстрированы некоторые функциональные аномалии при шизофрении. В 1974 г. Д. Ингвар из больницы Лундского университета (Швеция) обнаружил, что у шизофреников в лобных отделах мозга понижен уровень кровотока, что указывает на снижение уровня нейронной активности в этой области. Впоследствии этот

факт был подтвержден неоднократно (см. рисунок на с. 85).

Группа Вайнберга получила данные, позволяющие связать структурные и функциональные аномалии мозга шизофреников с особенностями их когнитивных функций. Если у здоровых испытуемых при выполнении Висконсинского теста по сортировке карточек (Wisconsin Card Sort), теста на оперативную память и теста на абстрактное мышление кровотока в префронтальной коре увеличивается существенно, то у больных шизофренией увеличение кровотока выражено слабо, и с перечисленными тестами они справляются хуже. Кроме того,

ослабление префронтального кровотока сильнее всего выражено у больных шизофренией с самыми маленькими структурами гиппокампа. Гиппокамп связан с префронтальной корой, которая у приматов управляет оперативной памятью (см. статью Патрисии С. Гольдман-Ракич «Оперативная память и разум» на с. 63).

Посмертное изучение тканей больных шизофренией вскрыло также ряд аномалий, касающихся числа нервных клеток головного мозга и их организации, особенно в височной доле. Тем не менее ни рубцов, которые могли бы появиться в ткани вследствие инфекции, ни прогрессирования этих

аномалий с возрастом не выявляется. Поэтому некоторые исследователи предполагают, что эти аномалии связаны с расстройством развития, возможно, с нарушением роста нейронов и развития их связей или же с нарушением процесса уточнения и ограничения нейронных связей, протекающим у нормальных людей в возрасте от 3 до 15 лет (см. статью Карла Дж. Шатца «Развивающийся мозг» на с. 23).

Каким же образом эти аномалии порождают симптомы шизофрении? Опираясь на людей, не страдавших шизофренией, У. Пенфилд из Монреальского неврологического института обнаружил, что некоторые структуры мозга связаны с галлюцинациями. (Пациенты во время операций на мозге часто остаются бодрствующими, тем самым помогая хирургу определить, какие функции выполняет ткань в оперируемой области и вокруг нее.) Пенфилд установил, что, когда диагностирующий электрод касался височной области, у пациента часто возникали видения и звуки, напоминающие галлюцинации.

Последующие исследования показали, что лобные отделы височной коры получают из других ее отделов информацию, подвергшуюся тщательной переработке и сенсорной фильтрации. Эта информация в конце концов достигает лимбической системы и других структур, опосредующих эмоциональные реакции. Поэтому возможно, что типичные для шизофреников переживания — слуховые галлюцинации и поступающее от всех органов чувств ощущение «ошеломленности» — возникают в результате сверхактивации височной коры или нарушения процесса сенсорной фильтрации.

Первые эффективные лекарственные препараты против шизофрении и депрессии ученые нашли случайно, ничего не зная об их действии на биохимические процессы в мозге. Хлорпромазин был введен в медицинскую практику в 1950 г. для обезболивания в хирургии, а оказался эффективным средством, облегчающим симптомы и шизофрении, и маниакально-депрессивного психоза. Поэтому хлорпромазин стал первым антипсихотическим лекарством, нашедшим широкое применение. Впоследствии ученые на основе метода синтеза хлорпромазина получили препарат имипрамин, который, как предполагалось, тоже должен обладать антипсихотическим действием. Однако имипрамин оказался очень эффективным для лечения депрессии. Литий был предложен для лечения маниакально-депрессивного психоза авст-

ралийским психиатром Дж. Кейдом, который в 1949 г. обнаружил, что соли лития оказывают седативное действие на лабораторных грызунов.

Изучение действия антидепрессантов началось с резерпина — препарата, полученного из растения *Rauwolfia serpentina*, используемого в традиционной индийской медицине. Резерпин был одним из первых эффективных средств снижения кровяного давления, но врачи заметили, что оно иногда вызывало у больных тяжелую депрессию; некоторые из них даже покончили самоубийством.

Биохимики обнаружили, что резерпин вызывает истощение запасов некоторых нейромедиаторов, относящихся к классу моноаминов, таких, как норадреналин, дофамин и серотонин. Все же известные к середине 60-х годов антидепрессанты вызывали накопление моноаминов в синапсах, либо подавляя их метаболический распад, либо препятствуя их обратному поглощению клетками из синаптического пространства.

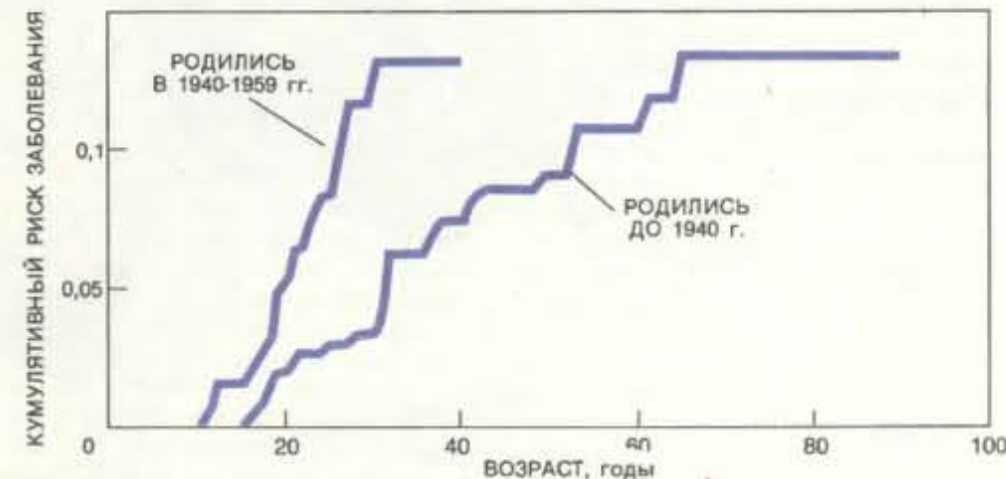
В 1965 г. эти факты привели Дж. Шилдраута, работавшего в то время в Национальном институте психического здоровья, к предположению, что депрессия связана со снижением синаптической доступности катехоламинов (норадреналина и дофамина), а маниакальный синдром — с ее увеличением. Однако некоторые антидепрессанты, например иприндол, не вызывают заметного изменения обратного поглощения или метаболизма норадреналина.

Поэтому фармакологи стали изучать те рецепторные молекулы в синапсах, которые связывают нейромед-

даторы. Ученым было известно, что норадреналин имеет несколько фармакологически отличных рецепторов (адренорецепторов), но их попытки связать с ними разные антидепрессанты не приводили к возникновению стойких сдвигов.

В 1975 г. Ф. Салсер и сотрудники из Университета Вандербиля разобрались в чем дело, обратив внимание не на само связывание, а на ту внутриклеточную реакцию, которую вызывает один из типов связывания. Ученые выяснили, каким образом норадреналин стимулирует β -рецепторы — класс адренорецепторов, опосредующих высвобождение циклического аденозинмонофосфата (сАМФ) внутри нервной клетки. Затем эта молекула служит вторичным мессенджером (химическим посредником в передаче сигнала). После длительного воздействия некоторых антидепрессантов, в том числе и иприндола, эта вторичная реакция ослабевает. Такой эффект вызывают, по сути дела, все антидепрессанты, включая те, которые были открыты уже после сообщения о нем в печати. Вызывает его и электросудорожная терапия — весьма эффективный метод лечения депрессии, при котором у больного путем электрошокового воздействия на мозг вызывают судороги.

Для каждого из моноаминов существует несколько разных рецепторов, и ученые продолжают открывать новые. Такие открытия способствуют более глубокому пониманию того, как антидепрессант изменяет функции рецепторов и их системы вторичных мессенджеров. Оказывается, многие (но не все) антидепрес-



ТРЕВОЖНАЯ ТЕНДЕНЦИЯ, прослеживаемая в разных поколениях, приводит к предположению, что увеличение частоты психических расстройств среди людей, генетически к ним предрасположенных, связано с каким-то фактором окружающей среды. Графики описывают две группы родственников больных, страдающих биполярным маниакально-депрессивным психозом: представители первой родились до 1940 г., второй — позднее. Риск развития биполярного расстройства или родственных ему психозов выше у представителей более молодых поколений, в каком бы возрасте ни проводилось сравнение.

санты нарушают регуляцию других рецепторов, включая постсинаптические и пресинаптические адренорецепторы, а также некоторых подклассов дофаминовых и серотониновых рецепторов.

Такое множественное действие лекарственных препаратов наводит на мысль, что в развитии маниакально-депрессивного психоза могут участвовать многообразные формы биологических дефектов. Дефекты в нервной передаче могут включать различные аномалии рецепторов и связанных с ними молекул; аномалии разных компонентов системы вторичного мессенджера; аномалии разнообразных белков, модулирующих транспорт ионов и косвенным образом увеличивающих или уменьшающих активность системы вторичного мессенджера; аномалии различных G-белков, сопряженных с рецепторами и стимулирующих или подавляющих внутри-

клеточные вторичные мессенджеры (см. статью: Морин Э. Линдер, Альфред Г. Гилман. G-белки, «В мире науки», 1992, № 9). Однако прямых свидетельств какой-либо из этих молекулярных аномалий у больных маниакально-депрессивным психозом найти до сих пор не удалось.

У МНОГИХ больных маниакально-депрессивным психозом приступы заболевания постепенно учащаются и принимают все более тяжелую форму. Такая картина течения болезни позволила Р. Посту из Национального института психического здоровья сопоставить ее с экспериментально наблюдаемым явлением, получившим название «раскачки». Чтобы вызвать у грызуна судороги, ученые стимулируют мозг животного электрическим током, «раскачивая» в нем судорожную активность. С каждым повторением этой процедуры

электрический порог возникновения судорог понижается, что в конце концов приводит к спонтанным судорогам.

Пост предположил, что сходным образом прогрессирует и маниакально-депрессивный психоз, причем каждый приступ болезни облегчает последующий. Это объясняет и характер прогрессирования заболевания, и те вредные эффекты, которые возникают при перерывах в лечении литием или противосудорожными препаратами. После такого перерыва больной может потерять способность реагировать на возобновление лечения, даже если раньше оно было эффективным.

Изучение биохимического действия нейролептиков, в том числе хлорпромазина, позволяет выяснить некоторые биологические аспекты шизофрении. А. Карлсон из Гетеборгского университета попытался объяснить,

почему эти препараты вызывают у животных избыточное образование продуктов распада дофамина. Он предположил, что это — своего рода компенсаторная реакция пресинаптического нейрона на постсинаптическую блокаду (см. рисунок на с. 86).

Когда стали известны различные молекулярные и фармакологические формы дофаминовых рецепторов, главным участком действия антипсихотических препаратов стали считать дофаминовый рецептор D_2 . Возможно, некоторые препараты взаимодействуют и с системами других нейромедиаторов; такие взаимодействия предполагают равновесие между нервными связями, содержащими дофаминовые рецепторы D_1 и D_2 , а также равновесие между связями, содержащими некоторые серотониновые рецепторы ($5HT_2$) и дофаминовые рецепторы D_2 .

Как недавно предположили М. и А. Карлсоны, при шизофрении происходит нарушение равновесия между дофаминовыми нейронами, тела которых расположены в среднем мозге, и локализованными в мозговой коре нервными клетками, содержащими глутамат. Нарушение этого равновесия может привести к образованию избытка дофамина, дефицита глутамата или же и к тому и другому эффекту одновременно. Уменьшение числа нейронов с глутаматом согласуется с наблюдаемой при шизофрении атрофией коры. Эта гипотеза объясняет также эффекты действия известных психотропных препаратов, прием которых нередко злоупотребляют: галлюциноген полихлорпропен (PCP) блокирует рецепторы глутамата, а амфетамин, хроническое потребление которого может вызывать психоз, стимулирует высвобождение дофамина.

Изучение биохимического действия этих препаратов и соответствующие клинические исследования открывают перед современной медициной зру

научно обоснованного назначения лекарственных препаратов. Когда нейрофармакологи поняли, что действие хлорпромазина связано с блокадой дофаминовых рецепторов, они смогли синтезировать галоперидол, который тоже сильно блокирует дофаминовые рецепторы, но слабо влияет на рецепторы других типов. Когда же стало известно, что антидепрессант имипрамин блокирует обратное поглощение нейромедиатора серотонина, был разработан флуоксетин, специфически подавляющий обратное поглощение серотонина, но очень мало влияющий на обратное поглощение других моноаминов.

Фармакология и нейробиология продолжают обогащать друг друга. Как показали проведенные за последние несколько лет клинические испытания, клозапин помогает приблизительно 30% тех больных шизофренией, которые не реагируют на лечение другими нейролептиками или у которых вследствие лечения развиваются побочные эффекты. Необычные свойства этого препарата, например его способность специфически взаимодействовать с некоторыми дофаминовыми и серотониновыми рецепторами (D_4 и $5HT_2$), может оказаться полезной для понимания самой природы шизофрении.

ОКАЗЫВАЕТСЯ, что в развитии депрессии принимают участие более разнообразные гормональные системы, чем считалось ранее. Гормон кортизол, вырабатываемый надпочечниками, — главный циркулирующий в организме стероид, связанный со стрессом. У многих пациентов с тяжелой депрессией выявляется повышенный уровень кортизола в крови, что может указывать на расстройство функций регулирующей его системы.

Дж. Крузос из Национального института детского здоровья и развития и Ф. Гоулд из Национального института психического здоровья рассматривают это расстройство как результат длительной активации системы стресса в головном мозге. Эта система представляет собой комплекс из нервных, гормональных и иммунных реакций и вступает в действие, когда какой-либо стрессовый фактор заставляет гипоталамические центры секретировать кортиколиберин. Этот фактор в свою очередь стимулирует гипофиз, заставляя его вырабатывать кортикотропин, который переносится кровью к надпочечникам и стимулирует секрецию ими кортизола. В норме этот процесс прекращается, когда избыток кортизола достигает его рецепторов (рецепторы глюко-

кортикоидов) в головном мозге и подавляет здесь выработку кортиколиберина. Гоулд, однако, установил, что у больных с депрессией происходит его избыточная выработка, а ее подавление нарушено.

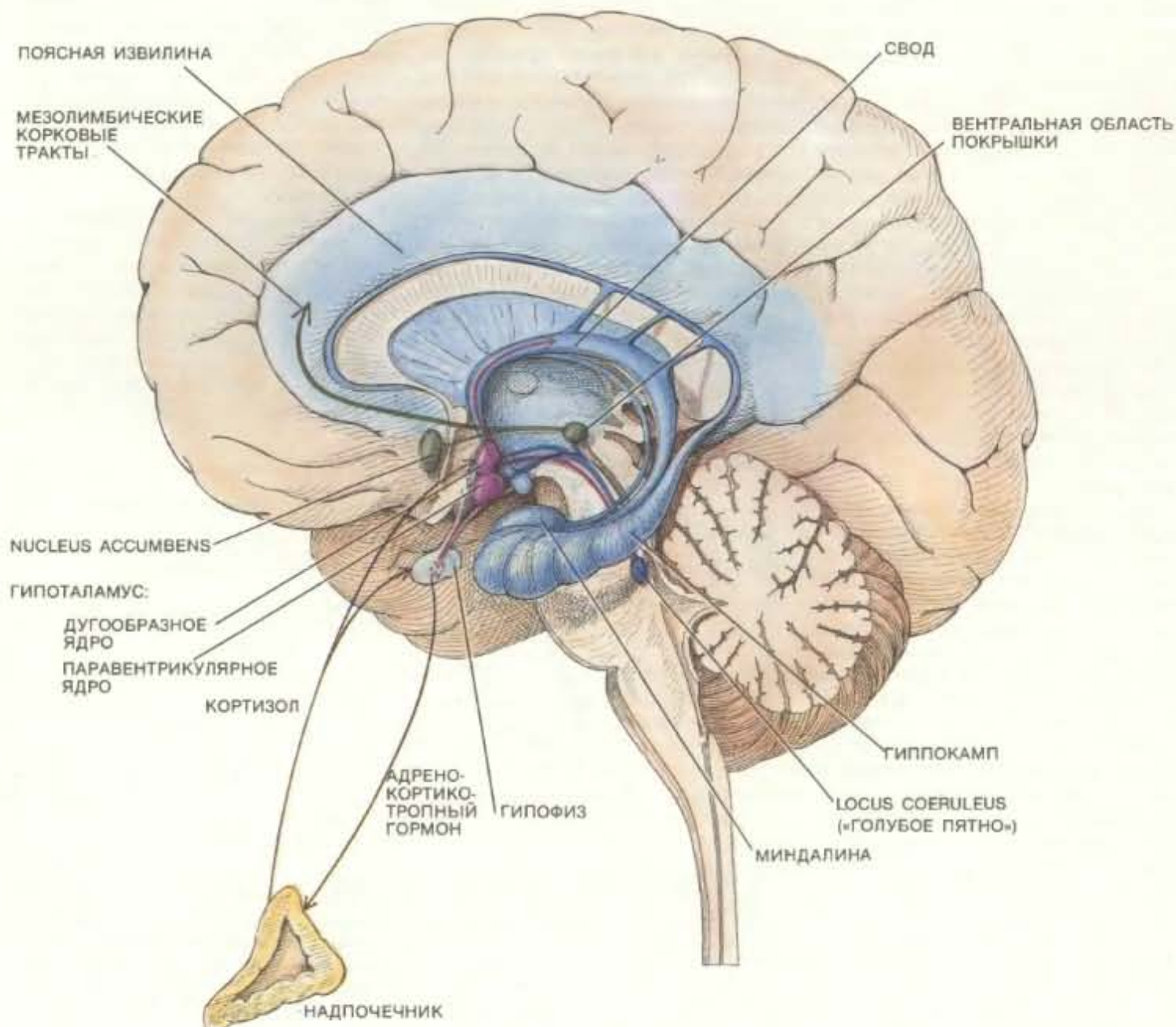
Нейроны гипоталамуса, вырабатывающие кортиколиберин, регулируются главным образом нейронами, которые содержат норадреналин и находятся в заднем мозге. Эти кортиколибериновые и норадреналиновые нейроны являются «узловыми станциями» системы стресса. Одна популяция нейронов стимулирует другую. Кроме того, обе они одинаково реагируют на многие нейромедиаторы и белковые модуляторы нервной передачи. Поскольку многие антидепрессанты способны влиять на эти нейромедиаторы, они должны действовать и на регуляцию системы стресса.

Стрессорная система мозга устанавливает уровень бодрствования и эмоционального тонуса, изменяет доступность разных форм информации для извлечения из памяти и анализа и способствует инициации тех или иных действий. Все эти функции нарушены у больных с депрессией, что вызывает подавленность, тревожную сосредоточенность и неспособность принимать решения.

К анатомическим структурам, образующим стрессорную систему, относятся голубое пятно (*locus coeruleus*) в заднем мозге (богатое нейронами, вырабатывающими норадреналин) и паравентрикулярное ядро гипоталамуса (главный производитель кортиколиберина в мозге). Эти структуры соединяются с большим мозгом посредством связей, включающих нейроны, которые выделяют дофамин и проецируются в мезолимбический дофаминовый тракт (участвует в регуляции мозговых систем мотивации и подкрепления). Связь нейронов, выделяющих кортиколиберин, с миндалинной и гиппокампом имеет важное значение для извлечения информации из памяти и эмоционального анализа информации, касающейся тех внешних событий, которые вызвали стресс.

Общие представления о нарушении регуляции стрессорной системы можно использовать для объяснения других психических и соматических заболеваний. Чтобы выяснить, имеется ли причинная связь между психическими расстройствами и описанной выше формой нарушения стрессовых реакций, потребуются обстоятельные исследования как общего, так и клинического характера.

Молекулярные генетики могут проверять гипотезы, касающиеся биологических механизмов этих психиче-



СТРЕССОРНАЯ СИСТЕМА МОЗГА простирается от заднего мозга и гипоталамуса до структур большого мозга, образующих лимбическую систему (*голубая*) и расположенных вокруг нее. В ней есть нейроны, содержащие норадреналин (*темно-синие*), кортиколиберин (*лиловый*) и дофамин (*зеленые*). Активация этой системы вызывает изменение настроения и мышления, а опосредованно — выработку кортизола надпочечниками. В норме спад ее активности начинается, когда кортизол связывается с гипоталамическими рецепторами. Однако при депрессии такого спада не происходит, и стрессорная система находится в состоянии хронической активации.

ских заболеваний, поскольку предрасположенность к ним, по всей вероятности, имеет наследственную природу. Однако система наследования шизофрении и маниакально-депрессивного психоза очень сложна. Ни одна из этих болезней не передается только с одним доминантным или рецессивным геном. Исследователь должен учитывать, что заболевание может возникнуть в результате координированного действия нескольких генов в нескольких разных локусах (местоположениях) или же, напротив, в результате генетической гетерогенности (при которой одна и та же болезнь может возникнуть вследствие мутации в каком-нибудь одном из нескольких локусов).

Для обнаружения патогенных генов существуют два основных подхода. Один предполагает систематическое изучение каждой хромосомы, другой — изучение «подозрительного» гена (например, определяющего какой-либо рецептор), в котором закодирована информация о белках, связанных с данным заболеванием.

В настоящее время существуют ДНК-маркеры почти для каждого сегмента всех хромосом. Каждый родитель передает потомку по одному сегменту той или иной хромосомы данной пары. Заболевание сцеплено с положением маркера на генетической карте только в том случае, если определенный сегмент хромосомы предка стойко наследуется вместе с болезнью в длинном ряду поколений. Если такая сцепленность существует, можно быть уверенным, что ген, ответственный за развитие болезни, располагается где-то в данном сегменте хромосомы.

С помощью такого картирования установлено, что в некоторых семьях, члены которых страдают болезнью

Альцгеймера, заболевание сцеплено с маркерами в длинном плече 21-й хромосомы. В случае маниакально-депрессивного психоза или шизофрении с уверенностью о такой сцепленности говорить нельзя. В одном широко известном исследовании длинной родословной была выявлена сцепленность между маниакально-депрессивным психозом и маркерами 11-й хромосомы; в другом исследовании ряда исландских и английских родословных шизофрения была сцеплена с маркерами 5-й хромосомы. Однако проведенный позднее анализ заставил авторов отказаться от своих выводов, а другим исследователям эти данные подтвердить не удалось.

Неоднократно сообщалось о сцепленности между маниакально-депрессивным психозом и маркерами на конце длинного плеча X-хромосомы, но оспаривается и этот факт. Более определенных результатов можно ждать от нескольких уже начавшихся широкомасштабных международных исследований, в которых предполагается анализировать полную генетическую карту семей, страдающих шизофренией или маниакально-депрессивным психозом.

Возникновение дефектов, способствующих развитию маниакально-депрессивного психоза или шизофрении, может быть обусловлено многими генами, в которых закодирована информация о молекулах, участвующих в нервной передаче. В Национальном институте психического здоровья М. Хохе, С. Детера-Вадлайх, В. Берреттини, П. Джэддман и один из авторов этой статьи (Э. Гершон) изучали несколько генов, «подозреваемых» в развитии маниакально-депрессивного психоза, проанализировав 20 родословных. Эти ученые проверяли структурные гены, опреде-

ляющие многие из описанных выше рецепторов: норадреналина (гены трех α -рецепторов и двух β -рецепторов), дофамина (D_2 и D_4) и кортикостероидов, а также ген одной субъединицы G-белка ($G_{\alpha o}$). Другие авторы изучали дофаминовый рецептор D_2 у членов семей с наследственной шизофренией. Связь между изученными генами и психическими болезнями при этом не выявлена.

Поскольку такая связь исключается, можно сделать вывод, что наследование предрасположенности к этим болезням не определяется мутациями «подозрительных» генов. Справедливость этого общего положения может поставить под сомнение только несовершенство современных статистических и технических методов изучения связи между генами и психическими заболеваниями. Мутации в «подозрительных» генах можно пытаться обнаружить также другими методами; кроме того, многие гены пока просто не изучались.

ПОСЛЕДНИЕ впечатляющие достижения в области нейробиологии, когнитивной нейропсихологии и генетики позволяют ожидать в ближайшем будущем значительных сдвигов в понимании биологических механизмов шизофрении и других психических расстройств. Это может способствовать решению таких проблем, как разработка точных диагностических тестов для людей с высоким риском психических заболеваний, создание новых терапевтических подходов на основе молекулярных механизмов этих болезней, выяснение того, каким образом взаимодействие факторов внешней среды и мозга приводит к их развитию, а также создание новых методов генотерапии.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

Молоко — причина диабета?

ЛОЗУНГ министерства молочной промышленности «Молоко полезно!» в наши дни звучит не очень убедительно. Недавно группа финских и канадских исследователей под руководством Х.-М. Доша из Детской больницы в Торонто обнаружила, что вследствие раннего перехода на кормление ребенка коровьим молоком в дальнейшем может развиваться

ювенильный (юношеский) диабет. По-видимому, у некоторых восприимчивых детей какой-то белок в составе молока способен инициировать иммунологическую перекрестную реакцию, приводящую к постепенному разрушению бета-клеток поджелудочной железы, вырабатывающих инсулин. Но это не значит, что не следует использовать молочных смесей для вскармливания детей — целесообразнее применять различные подходы для предотвращения диабета, в частности вакцинацию.

Попытки выяснить происхождение ювенильного диабета, называемого также инсулин-зависимым или диабетом типа I, довольно долго были безуспешны. Известно, что примерно у 25% населения имеется хотя бы один генетический маркер, ассоциированный с диабетом, но лишь менее 1% из них действительно заболевают. Этим Дош объясняет тот факт, что у 85% больных в родословной нет случаев диабета.

В середине 1980-х годов появилось подозрение, что причиной болезни

может быть какой-то фактор в составе коровьего молока. Эпидемиологические и клинические данные свидетельствовали о корреляции между заболеваемостью диабетом и потреблением молока на душу населения, причем у детей, вскормленных материнским молоком, диабет встречается реже. Отмечалось также, что если крыята, предрасположенные к диабету, первый месяц своей жизни получают рацион без коровьего молока (которое обычно входит в пищу лабораторных животных), то они не заболевают. Кроме того, у крыс с диабетом в крови высокая концентрация антител против альбумина кровяной сыворотки крупного рогатого скота, а этот белок содержится в молоке. В 1991 г. Дош с коллегами установил, что антитела против одного из фрагментов молекулы альбумина перекрестно реагируют с белком р69, имеющимся в бета-клетках.

Группа Доша пытается провести сравнительный анализ данных, полученных в экспериментах с животными, и соответствующих наблюдений у человека. По сообщению, опубликованному им в прошлом году в июльском номере «New England Journal of Medicine», у детей, недавно заболевших диабетом, концентрация антител против фрагмента альбумина коровьего молока и белка р69 в сыворотке крови почти в семь раз выше, чем у их здоровых сверстников. Через два года после того, как поставлен диагноз, эти антитела исчезают, что, по-видимому, обусловлено исчезновением к этому времени р69 из бета-клеток.

По мнению Доша, наличие у человека антител против белков коровьего молока вполне нормально, поскольку вплоть до трехмесячного возраста через пищеварительный тракт ребенка проходят довольно крупные белковые фрагменты. В норме иммунная система становится толерантной к чужеродным белкам, проникающим в организм через пищеварительный тракт; иными словами, ее реакция проявляется лишь как слабая малоэффективная атака на эти белки. В случае же ювенильного диабета механизм толерантности к данному белковому фрагменту, как считает Дош, не срабатывает.

Согласно его гипотезе, «недостаток» со стороны иммунной системы выливается в трагическую цепь реакций, которые инициируются вирусными инфекциями. В ответ на вирус в организме высвобождается интерферон, мобилирующий иммунную систему. Кроме того, под действием интерферона на поверхности бета-клеток появляется большое количе-

ство белка р69, схожего с фрагментом сывороточного альбумина коровьего молока. Будучи примирована (от лат. *primus* — первый) воздействием этого фрагмента, иммунная система атакует бета-клетки, и те гибнут. В результате при каждом случае вирусной инфекции организм теряет еще какую-то часть бета-клеток. «Эта модель впервые дает объяснение тому факту, что для развития диабета требуется от восьми до десяти лет», — утверждает Дош.

Однако данные о роли альбумина коровьего молока в возникновении диабета не вполне убедительны. Хотя концентрация антител к данному белковому фрагменту очень велика, свидетельствуя о высокой чувствительности иммунной системы к нему, Дош и другие исследователи диабета сомневаются в способности этих антител разрушать бета-клетки. Скорее всего в возникновении диабета повинны Т-лимфоциты, атакующие аномальные клетки. Сейчас ведутся поиски лимфоцитов, реагирующих на альбумин сыворотки крупного рогатого скота.

Специалист по диабету М. Аткинсон из Медицинского колледжа Флоридского университета в Гейнсвилле полагает, что необходимо выяснить, есть ли антитела против фрагмента альбумина коровьего молока у людей из группы риска в отношении диабета. «Если они действительно вызывают диабет, то должны присутствовать задолго до проявления заболевания», — считает он. Тем не менее Аткинсона привлекает возможность использования описанных Дошем антител для более точной диагностики диабета.

Окончательная проверка гипотезы о роли коровьего молока в возникновении ювенильного диабета планируется в будущем году. Более 3000 новорожденных, в семье которых зарегистрированы случаи этого заболевания, будут в течение первых девяти месяцев жизни получать специальную диету, включающую материнское молоко и молочную смесь, не содержащую альбумин коровьей сыворотки. Затем на протяжении 5—10 лет их должны наблюдать для определения заболеваемости диабетом. Однако организация такого обследования — дело непростое. Затрудняется оно, в частности, тем обстоятельством, что в материнское молоко могут проникать компоненты молочных продуктов, потребляемых матерью.

Дош, Аткинсон и другие специали-

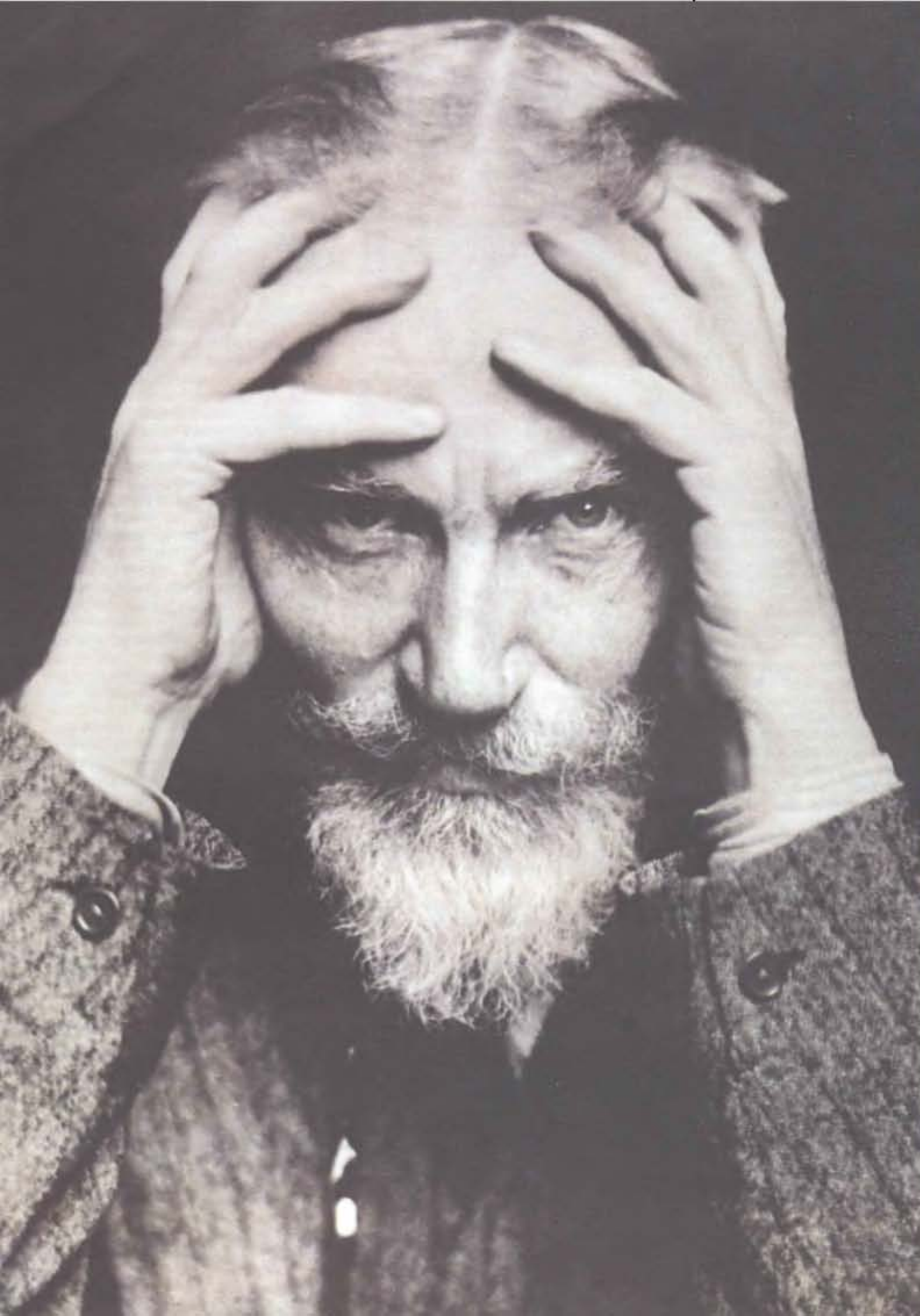


ИСТОЧНИК: *Diabetes Care*, 1991

сты предостерегают от введения запрета на молочные продукты для детского питания, поскольку проведенная работа носит предварительный характер. «Коровье молоко — очень ценный источник белков, — подчеркивает Дош. — Оно дешево и доступно». Кроме того, молоко используется очень широко. Так, сывороточный альбумин находит применение в качестве эмульгирующего и стабилизирующего средства при изготовлении многих пищевых продуктов. Строгий запрет на использование молочных продуктов повлечет за собой необходимость внести изменения в традиционную кухню западных стран. «Если же речь идет о трехмесячной диете для генетически чувствительных людей, то этот подход реален, — считает Аткинсон. — Сывороточный альбумин коровьего молока входит в состав очень многих пищевых продуктов, и было бы очень трудно, а то и вообще невозможно, исключить его из питания на многие годы».

По этой причине Дош и другие исследователи пытаются найти иные пути применения своих открытий. Один из них — создание вакцин, обеспечивающих толерантность к сывороточному альбумину. «Мы получили вакцину, которая в опытах с крысами предотвращает развитие диабета в 80% случаев. Но, к сожалению, у остальных 20% животных болезнь развивается быстрее и носит более тяжелый характер», — рассказывает Дош. Возможно, также выведение трансгенных коров, сывороточный альбумин которых не столь похож на р69, — для этого достаточно заменить лишь несколько аминокислот. По словам Доша, для реализации этой возможности группы, работающие в молочной и смежных отраслях промышленности в США и Европе, уже вступили с ним в контакт.

Джон Ренни



Стареющий мозг

В конце жизни мозг человека страдает от износа некоторых нейронов и подвергается химическим изменениям. Тем не менее у многих людей эти изменения не приводят к заметному снижению интеллекта

ДЕННИС ДЖ. СЕЛКО

ПОСМОТРИТЕ на старость глазами Шекспира. Незабвенный персонаж его пьесы «Как вам это понравится» лорд Жако насчитывал семь возрастных периодов у человека, заключая подсчет следующей грустной строфой:

И в конце этой странной природной цепочки Второе детство и полная памяти потеря.

Для большинства из нас, как и для Жако, перспективы старения сводятся к воображаемым картинам неумолимого опустошающего увядания, медленного продвижения к безумию и смерти. Но так ли неизбежны возрастные нарушения функций мозга, а следовательно, и психики?

Ответ однозначный: нет. Результаты проведенных исследований позволяют предположить, что по мере отдаления от юношеского возраста некоторые молекулы и клетки мозга все более повреждаются или элиминируются. Некоторые такие изменения могут подавить умственные (когнитивные) способности, если при накоплении превысят определенный порог. Тем не менее результаты изучения поведения человека позволяют предположить, что накопление изменений, нарушающих умственную деятельность, ни в какой мере не является неизбежным спутником долгожительства.

По-видимому, стареющие люди, действительно утратившие разум, являются жертвами специфических заболеваний, заметно углубляющихся с возрастом или накладывающихся на процессы старения. В развивающихся странах главной причиной старческой деменции (слабоумия) — возрастной потери памяти и мотивации — является болезнь Альцгеймера. К числу других причин относятся множественные инсульты или болезнь Паркинсона.

Врачи не всегда могут отличить стариков, страдающих слабой, относительно стабильной потерей памяти, от больных на ранних стадиях болезни Альцгеймера или других прогрессирующих нарушений. Углубление исследований нормального старения и нарушений умственной деятельности поможет врачам установить критерии такого отличия и даст начало развитию паллиативной и профилактической терапии. Для большинства исследователей стареющего мозга конечной целью остается улучшение качества его функционирования у пожилых людей, что необязательно связано с проблемой продления жизни; тем не менее решение второй проблемы может быть результатом решения первой.

ДЖОРДЖ БЕРНАРД ШОУ, который умер в 1950 г. в возрасте 94 лет, написал несколько своих пьес после 90-летия. Одной из главных целей исследователей старения мозга является увеличение числа людей, сохраняющих здоровый ум в течение всей жизни.



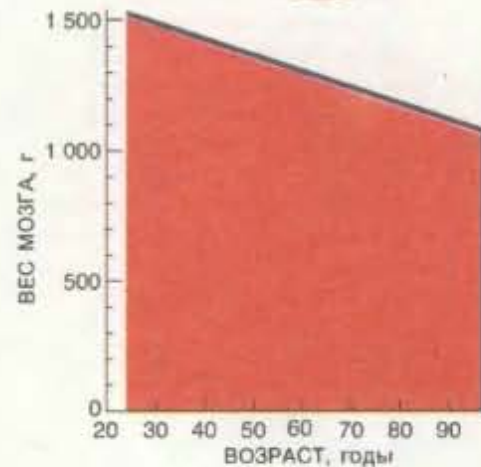
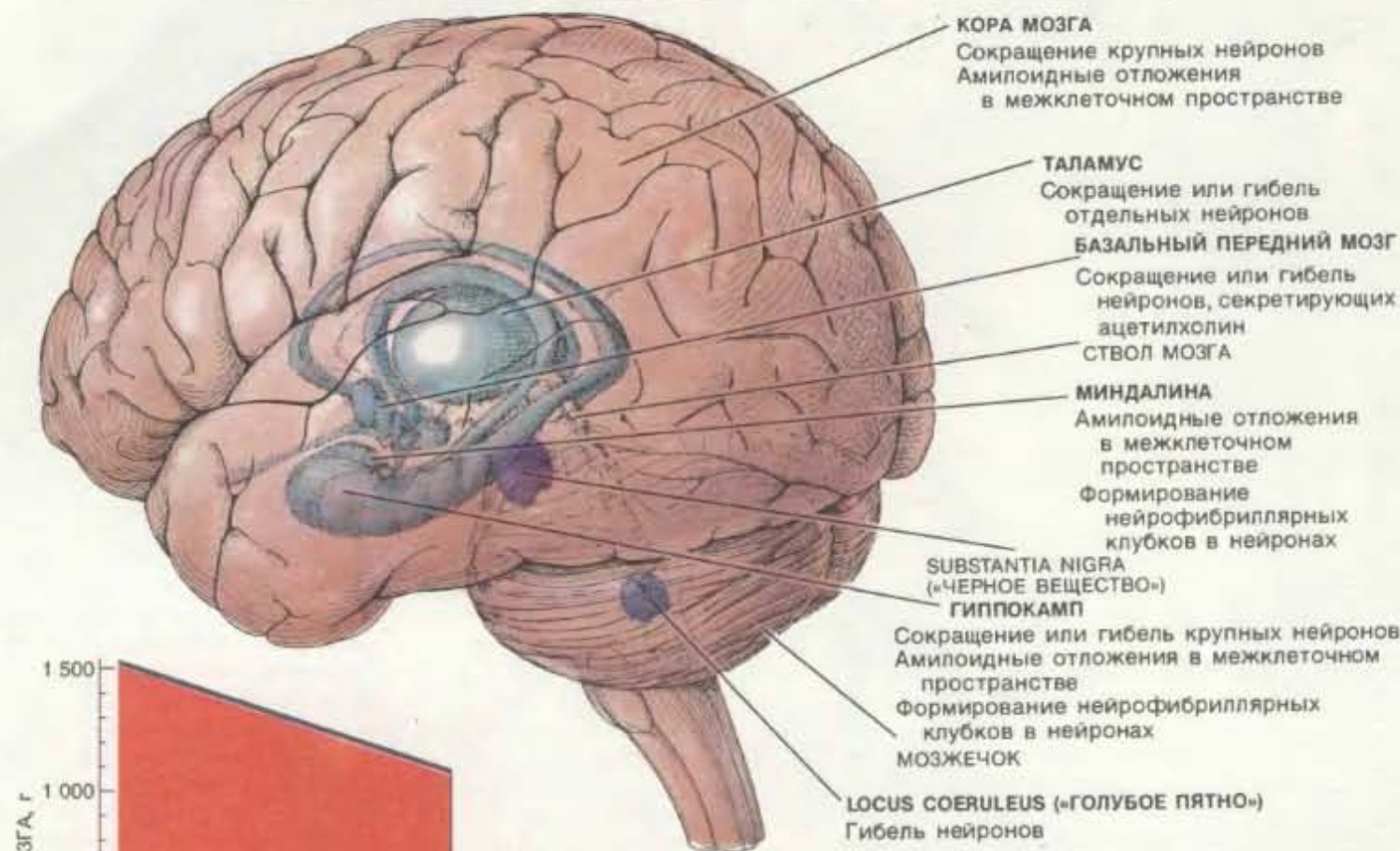
При изучении структурных и химических изменений, характерных для стареющего мозга в отсутствие заболеваний, ученые обнаружили, что эти изменения столь же гетерогенны, как и сам мозг. В состав мозга входят не только различные нейроны (клетки, передающие нервные сигналы), но и разнообразные глиальные клетки, выполняющие опорные функции и участвующие в репарационных процессах. Некоторые сообщества клеток и участки мозга оказываются более подверженными свя-

занными с возрастом повреждениям, чем другие. Кроме того, возраст, при котором обнаруживаются признаки нарушений, набор и степень наблюдаемых физических изменений, а также влияние этих изменений на интеллект могут резко варьировать у различных людей. Тем не менее можно утверждать, что большинство структурных и химических изменений, о которых пойдет речь ниже, проявляется в конце второй половины жизни, между 50 и 60 годами. Некоторые из них становятся заметными только после 70 лет. Маловероятно, что в основе всех признаков одряхления (связанного с возрастом нарушения функций клеток и молекул мозга) лежит единый механизм и исследователям удастся найти какой-либо единственный «эликсир», тормозящий или обращающий все признаки старения.

Возрастные изменения наиболее изучены в нейронах, число которых вообще не увеличивается после рождения. По мере взросления человека общее число нейронов в мозге снижается, но этот процесс происходит неравномерно. Так, например, очень мало нейронов исчезает из области гипоталамуса, который регулирует секрецию ряда гормонов гипофизом.

И наоборот, значительно большее число клеток имеет тенденцию к исчезновению из черного вещества (substantia nigra) и голубого пятна (locus coeruleus), представляющих собой популяции специализированных клеток в стволе мозга. При болезни Паркинсона эти области могут утрачивать до 70% нейронов и более, что приводит к сильным нарушениям моторных функций. При старении как таковом потеря клеток в этих областях оказывается значительно ниже, хотя у некоторых стариков с симптоматикой, напоминающей начальный паркинсонизм (уменьшение гибкости, замедление движений, запинаясь шаркающая походка), может отмечаться утрата 30—40% исходного числа клеток.

УЧАСТКИ лимбической системы, включая гиппокамп также могут терять то или иное число клеток. (Лимбическая система играет центральную роль в обучении, памяти и эмоциональных реакциях.) По оценкам исследователей около 5% нейронов гиппокампа утрачивается за каждое десятилетие второй половины жизни, т. е. в этот период теряется около 20% нейронов. Причем потери не-



СТРУКТУРЫ МОЗГА, обозначенные жирным шрифтом, участвуют в процессах обучения, памяти и рассуждений. В норме эти структуры претерпевают в конце жизни некоторые анатомические изменения, которые потенциально могут нарушить умственную деятельность. Перечисленные здесь изменения являются выборочными и обычно наблюдаются только в отдельных частях пораженных структур. Вес мозга также снижается с возрастом (график слева). Р. Терри с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего, которые собрали представленные на графике данные, пришли к выводу, что наблюдаемое снижение частично обусловлено сокращением крупных нейронов.

равномерны: некоторые участки гиппокампа сохраняют практически все нейроны.

Даже когда нейроны сами по себе остаются жизнеспособными, их тела и сложные отростки (нейриты) могут атрофироваться. Нейрон обладает одним длинным отростком, называемым аксоном, который передает сигналы другим нейронам, часто значительно удаленным. Более многочисленные короткие отростки — дендриты, образующие ветвистое обрамление тела нейрона, воспринимают сигналы от других нейронов.

Сопутствующая старости атрофия нейритов и тел нейронов обычно отмечается в отделах мозга, участвующих в обучении, запоминании, планировании и других сложных умственных процессах. В частности, отмечается сокращение крупных нейронов в участках гиппокампа и коры мозга. Отмечается также дегенерация тел и аксонов некоторых секретирующих ацетилхолин нейронов, проецирующихся из базальной части переднего мозга в гиппокамп и различные участки коры. (Ацетилхолин — один из

нейромедиаторов, с помощью которого происходит передача сигналов от одного нейрона к другому.)

ДАЛЕКО не все изменения нейронов обязательно деструктивны. Некоторые изменения могут отражать попытку нейронов компенсировать утрату или сокращение других нейронов и их проекций. Так, П. Колеман, Д. Флад и С. Бьюлл из Медицинского центра Рочестерского университета наблюдали рост дендритов в некоторых участках гиппокампа и коры мозга у людей в возрасте от 40—50 лет до начала старения (70 лет) с последующей регрессией дендритов в ходе дальнейшего старения (после 80 лет). Эти исследователи предположили, что начальный рост дендритов отражает попытку жизнеспособных нейронов нейтрализовать последствия происходящей с возрастом утраты соседних нейронов. По-видимому, эта компенсаторная способность утрачивается у очень старых нейронов. Сходная способность к росту обнаружена у взрослых крыс: более длинные и более сложные дендриты появля-

ются в зрительной коре животных после ее стимуляции.

Эти результаты обнадеживают. Они показывают, что мозг способен к динамической перестройке нейронных сетей даже в поздние годы жизни и что соответствующая терапия может увеличивать эту пластичность. Однако необходимо еще оценить функциональность дендритов, формирующихся в пожилом возрасте.

Кроме изменений числа и структуры клеточных тел и нейритов нейроны могут также претерпевать изменения своей внутренней архитектуры. Например, цитоплазма определенных клеток в гиппокампе и других участках мозга, важных для обучения и запоминания, может начать заполняться пучками спиральных белковых филаментов, известных под названием нейрофибриллярных «клубков». Считают, что увеличение числа таких клубков в этих и других участках мозга связано с развитием слабоумия при болезни Альцгеймера, но роль небольшого числа клубков в здоровом мозге менее ясна. Образование нейрофибриллярных клубков при ста-

рени означает, по-видимому, что некоторые белки, особенно белки цитоскелета и внеклеточных опорных структур, химически модифицируются таким образом, что могут воздействовать на эффективность передачи сигналов нейронами.

К другим внутренним изменениям относится появление в цитоплазме нейронов многих участков мозга огромного числа вкрапленных гранул, содержащих флуоресцирующий пигмент липофусцин. Считается, что этот пигмент происходит из богатых липидами наружных мембран, образуясь в результате их неполной деструкции. И в этом случае исследователи не пришли к единому мнению о том, повреждают ли липофусциновые гранулы клетки или же они являются маркерами долгожительства.

Как и нейроны, глиальные клетки, которые играют опорную роль в функционировании мозга, подвержены изменениям. Р. Терри из Калифорнийского университета в Сан-Диего и другие исследователи установили, что размер и число глиальных клеток типа фиброзных астроцитов постоянно увеличиваются после 60-летнего возраста. Размножение этих клеток, которые выделяют разные факторы, способствующие росту нейронов и нейритов, приводит к не известным пока последствиям. Возможно, этот процесс представляет другой способ, с помощью которого мозг пытается компенсировать снижение числа нейронов и нарушение их структуры.

Вне нейронов мозговая ткань также подвергается изменениям. У человека, обезьян, собак и некоторых других животных внеклеточное пространство гиппокампа, коры и других отделов мозга обычно заполняется сферическими отложениями, называемыми сенильными бляшками. Эти очень медленно формирующиеся образования являются первичными агрегатами небольших молекул, известных как β -амилоидные белки. Амилоидный белок накапливается также в кровеносных сосудах этих областей и мозговых оболочках — соединительной ткани, окружающей мозг.

Пока не удалось выяснить, какие клетки являются источником этих белковых отложений и каково их влияние на соседние нейроны у здоровых стареющих людей. Однако ответ на этот вопрос должен быть вскоре получен, поскольку резкое увеличение отложений амилоидного белка при болезни Альцгеймера выдвинуло эту проблему на передний край исследований.

РАЗНООБРАЗНЫЕ структурные изменения в стареющем мозге вызваны негативными изменениями ак-

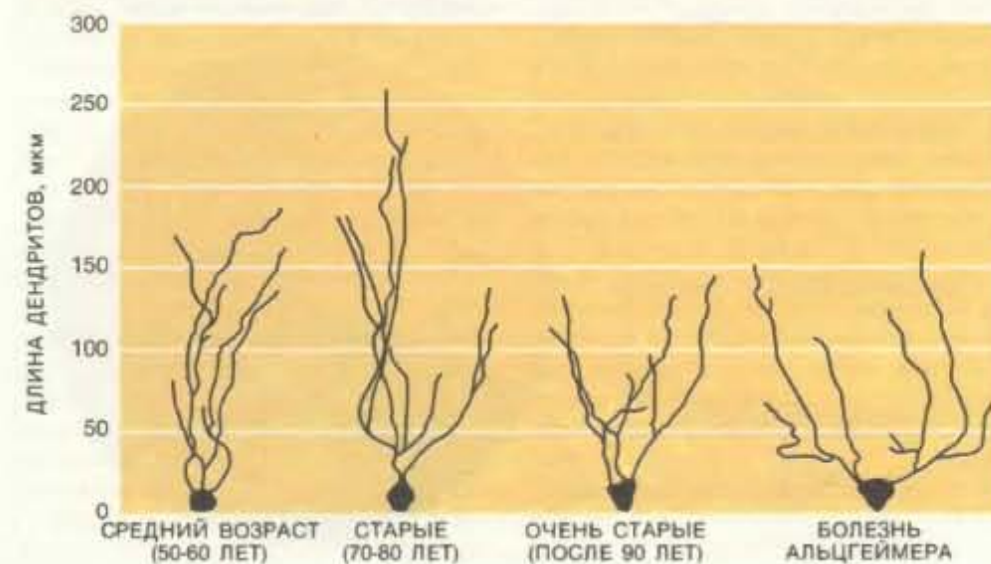
тивности или числа молекул, обеспечивающих целостность и функционирование клеток. Согласно одной из наиболее распространенных теорий старения, клетки стареющего организма становятся дефектными вследствие медленного накопления нарушений в своих генах. Гены, состоящие из ДНК, несут информацию о синтезе белков. Повреждение ДНК приводит к снижению качества или количества необходимых белков (таких, как специфические ферменты) в клетках. Повреждение может также усилить активность или увеличить количество нежелательных белков (таких, например, которые способствуют развитию рака).

До последнего времени генетические исследования были сосредоточены в основном на хромосомной ДНК ядер — длинных нитях спиральных ДНК, являющихся хранилищем генов практически всех белков, производимых клетками. Проведенные исследования показали, что ферментативная система, предназначенная для репарации поврежденной ДНК, становится менее эффективной к концу жизни и, возможно, при некоторых заболеваниях мозга. Ученые установили так-

же, что при старении ослабляется и клеточный контроль генетической активности. Одним из механизмов такого ослабления может быть исчезновение метильных групп из определенных участков молекул ДНК (см. статью: Р. Холлидей. Эпигенетическая наследственность, «В мире науки», 1989, № 8).

В последние годы было высказано предположение о том, что в процессы старения вовлечена ДНК из внутриклеточных органелл, называемых митохондриями. Митохондрии — это «энергетические фабрики» клеток, обеспечивающие их жизненно важной энергией. Они содержат собственный набор ДНК, в котором заключены инструкции для производства 13 белков, необходимых для генерации энергии. Если в митохондриальной ДНК медленно накапливаются нарушения, то это приводит к образованию дефектных митохондриальных белков или элиминации этих белков.

В основе представлений о причинной роли митохондриальной ДНК некоторых связанных с возрастом изменений лежит тот факт, что, по-видимому, эта ДНК в большей степени, чем ядерная, подвержена наруше-



НЕЙРОНЫ ГИППОКАМПА (фотографии сверху) окрашены в препаратах мозга, взятых у здоровых людей в возрасте после 50, 70 и 90 лет и у пациента с болезнью Альцгеймера (слева направо). Д. Флад и П. Колеман из Медицинского центра Рочестерского университета обнаружили, что средняя длина дендритных деревьев (ветвящиеся формы) у таких нейронов увеличивается между средним и пожилым возрастом и уменьшается только у очень старых людей (рисунки внизу). Нормальный рост может отражать компенсацию деструктивных возрастных изменений в мозге. При болезни Альцгеймера связанный с возрастом рост дендритов не наблюдается.

Слабоумие в США

В 1992 г., согласно результатам Фреймингемского исследования, в котором многократно оценивается состояние здоровья большой группы пациентов по мере их старения, преобладает слабоумие (а), включая болезнь Альцгеймера (b). Данные по болезни Альцгеймера отличаются от результатов, представленных группой Восточного Бостона (возглавляемой Д. Эвансом из Меди-

цинской школы Гарвардского университета), по-видимому, вследствие того, что Фреймингемская группа использует более широкое определение заболевания. Результаты этой группы, а также других групп указывают на болезнь Альцгеймера как на ведущую причину слабоумия в конце жизни (с). Здесь перечислены некоторые примеры излечиваемого в настоящее время слабоумия (d).



в РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН СЛАБОУМИЯ*



* Сумма не соответствует 100% вследствие округления значений

д НЕКОТОРЫЕ ПРИЧИНЫ ИЗЛЕЧИВАЕМОГО СЛАБОУМИЯ

Медикаментозное лечение	Давление на мозг кровяных сгустков
Депрессия	Метаболический дисбаланс
Недостаточность витамина В ₁₂	(включая нарушения щитовидной железы, печени или почек)
Хронический алкоголизм	
Некоторые опухоли и инфекции мозга	

ниям. Одной из причин этого может быть более низкая эффективность системы репарации ДНК в органеллах, чем в ядрах. Кроме того, митохондриальная ДНК может быть более подвержена воздействию высокорезактивных кислородных соединений, известных под названием свободных радикалов. Эти соединения являются постоянными побочными продуктами реакций, в ходе которых митохондрии вырабатывают энергию. Свободные радикалы образуются и при других клеточных процессах, а также в ответ на ионизирующее облучение. Они окисляют, т. е. добавляют атомы кислорода к молекулам, тем самым изменяя их.

Обнаружено также, что активность цитохромоксидазы — ключевого фермента, кодируемого митохондриальной ДНК, снижается в мозге стареющих крыс. Некоторые исследователи идентифицировали специфические делеции в последовательностях митохондриальной ДНК мозга у пожилых больных с определенными возрастными заболеваниями мозга, такими, как болезнь Паркинсона.

ЕСЛИ ДАЖЕ большинство ядерных и митохондриальных генов остаются неизменными и обеспечивают производство правильных белков на адекватном уровне, последующая модификация этих белков может привести к молекулярным дефектам в конце жизни. Белки претерпевают множество различных химических модификаций, включая окисление некоторых входящих в их состав аминокислот, гликозилирование (присоединение боковой углеводной цепи) и образование поперечных сшивок (прочных химических мостиков между молекулами). Эти модификации представляют собой нормальный процесс и обеспечивают выполнение белками своих функций. Однако появляется все больше данных о том, что при старении во многих белках накапливаются бесполезные модификации. Так, содержание окисленных белков в коже человека и мозге крыс прогрессивно увеличивается. У очень старых крыс их количество может достигать 30—50% общего количества белка в клетках. У молодых людей с прогерией — редким синдромом, выражающимся в преждевременном старении многих тканей, содержание окисленных белков достигает того же уровня, что и в клетках здоровых 80-летних стариков.

Наиболее пристальное внимание привлекают ферменты, поскольку они представляют собой белки, катализирующие большинство важных химических реакций в клетках. Неко-

торые ферменты, синтезирующие нейромедиаторы или их рецепторы, действительно снижают свою активность при старении. Для некоторых из этих ферментов частичной причиной такого изменения явились модификации после их синтеза.

Однако протеназы — ферменты, разрушающие окисленные и другие белки, сами подвергаются окислению и потере активности. Проблема повреждения протеназ, чреватого негативными последствиями, может усугубиться параллельным снижением активностей пероксидазы и каталазы. Эти ферменты в нормальных условиях инактивируют свободные радикалы и защищают различные типы молекул от окислительного повреждения. Старение сопровождается увеличивающимся дефицитом этих ферментов, по крайней мере у крыс.

Дж. Карни из Университета шт. Кентукки, Р. Флад из Фонда медицинских исследований шт. Оклахома и их сотрудники впервые представили недавно данные о том, что такое окисление может приводить к нарушению умственных способностей. При сравнении молодых и старых песчанок они обнаружили, что у более старых животных окисленным оказывается значительно большее количество белков. Это увеличение сопровождается снижением активности некоторых ключевых ферментов. Кроме того, старые песчанки испытывают большие трудности, чем молодые, при прохождении радиального лабиринта.

Когда старым песчанкам вводили соединение (N-трет-бутил-α-фенилнитрон), инактивирующее свободные радикалы и, следовательно, ослабляющее окисление, у животных снижалось содержание окисленных белков и активность ферментов увеличивалась до уровня, характерного для молодых песчанок. Еще более важно то, что наблюдаемые биохимические изменения сопровождались восстановлением поведенческих реакций у животных в лабиринте до уровня, характерного для молодых песчанок. При прекращении терапии содержание окисленных белков и ферментативная активность возвращались к уровням, типичным для животных старого возраста.

При старении отмечается также изменение структуры и содержания в мозге многих важных небелковых молекул. Имеются данные о том, что при старении происходит химическая модификация длинноцепочечных углеродных соединений в липидных мембранах, окружающих клетки и внутриклеточные органеллы. К числу таких модификаций относится дельта-окисление свободными

радикалами. В результате происходит «сдвиг» химического состава мембран, что может вызвать тонкие изменения их поведения.

В частности, исследователи продемонстрировали связанное с возрастом снижение текучести мембран, окружающих синапсомы — нейронные везикулы (пузырьки), служащие для хранения и выделения нейромедиаторов. Возрастные изменения затрагивают также липидный состав изолирующей миелиновой оболочки аксонов. Изменения миелина могут существенно влиять на скорость и эффективность прохождения электрического импульса по нервным волокнам на большие расстояния.

РАССМОТРЕННЫЕ выше молекулярные изменения составляют лишь небольшую часть изменений, обнаруженных в стареющем мозге человека и других млекопитающих. Пытаясь понять смысл этих изменений, ученые сталкиваются с проблемой «телеги» и «лошади» из известной поговорки. Так, не вызывает сомнения, что в ДНК в течение многих лет накапливаются повреждения. Но приводят ли эти повреждения, например, к увеличению окисления ферментов или же такое окисление происходит первым и приводит к накоплению повреждений в ДНК? Скорее всего реализуются обе причинно-следственные связи. Как только происходит ряд каких-либо процессов, они усиливают другие процессы, в результате чего начинается сложный каскад событий.

Столь же важным является вопрос о том, какое влияние все эти разнообразные анатомические и физиологические возрастные изменения оказывают на психику. Для многих людей ответ может быть: «очень слабое». До тех пор пока нет возможности проводить широкомасштабную регистрацию умственной активности здоровых старых людей в период, близкий к смерти, и сопоставлять полученные результаты со структурными и функциональными изменениями, происшедшими в их мозге, какая-либо связь между специфическими физическими изменениями и нарушением психики будет оставаться весьма туманной.

Мы знаем, что у людей, не страдающих болезнью Альцгеймера или другими специфическими расстройствами, связанными с поражением мозга, степень анатомических и физиологических изменений оказывается довольно умеренной. Во многих исследованиях возрастных нейрохимических нарушений, таких, как снижение активности отдельных ферментов, содержания некоторых белков или

РНК, измеряемые уровни у старых людей оказываются лишь на 5—30% ниже, чем у молодых. Примерно в такой же степени происходит утрата нейронов в различных участках мозга.

Хотя 30%-ная потеря может казаться достаточно большой, такое постепенное снижение часто не оказывает влияния на процессы мышления. Результаты обследования с помощью позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) показывают, что мозг здоровых 80-летних людей почти так же активен, как и мозг 20-летних. Как и в случае других органов, мозг, по-видимому, обладает значительным физиологическим резервом, обеспечивающим его толерантность к небольшим потерям в функционировании нейронов.

Аналогичная картина вырисовывается на основании эпидемиологических и физиологических исследований. Оценки распространенности слабоумия варьируют, но наиболее полные из них, полученные в исследованиях Д. Эванса с коллегами из Медицинской школы Гарвардского университета, показывают, что в группе людей старше 65 лет слабоумие отсутствует почти у 90% обследованных. В 1991 г. эти ученые сообщили, что среди людей в возрасте между 65 и 75 годами слабоумие отмечалось менее чем у 5% обследованных, а в возрастной группе между 75 и 84 годами его частота увеличилась до 20%. В возрастной группе людей старше 85 лет частота случаев слабоумия резко возросла до 50%, что вдвое выше некоторых опубликованных ранее оценок. Таким образом, весьма значительное число людей старше 75 лет сохраняют умственные способности.

К такому же выводу приводит анализ результатов тестирования умственных способностей у здоровых пожилых людей. Например, А. Бентон, Д. Транел и А. Дамазину из Медицинского колледжа Университета шт. Айова обнаружили, что, когда люди в возрасте 70—80 лет сохраняют хорошее здоровье, у них лишь незначительно снижаются результаты тестов на память, восприятие и языковых тестов.

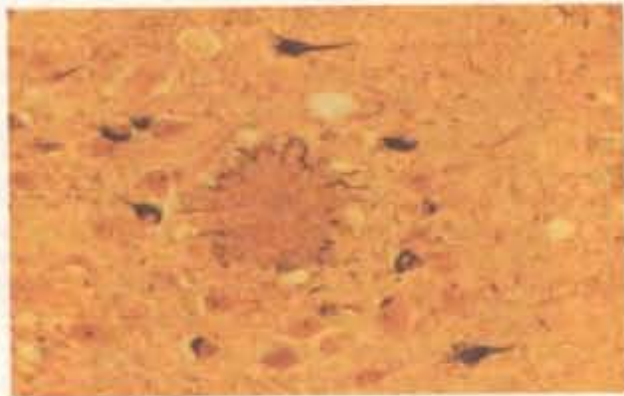
Как свидетельствуют результаты многих исследований, возрастному снижению подвержены некоторые аспекты умственной деятельности, связанные с быстрой реакцией. Так, 70-летние могут быть не в состоянии быстро вспомнить некоторые детали прошлых событий, таких, как точная дата или место, но они часто могут сделать это спустя минуты или часы. При отсутствии временных ограничений и в условиях, исключающих воз-

никновение чувства беспоконья, большинство здоровых стариков достигают такого же результата в тестах на умственную деятельность, как и молодые люди, а также люди среднего возраста. Чем сложнее задача (например, математическая), тем, конечно, больше вероятность того, что иной здоровый в остальном человек преклонного возраста справится с ней хуже, чем молодой. Источником некоторого оптимизма могут служить результаты многих исследований нормального старения: одни люди в последние годы жизни теряют способность к быстрому запоминанию и обучению, тогда как у других эти способности сохраняются почти полностью.

Таким образом, результаты физиологических, эпидемиологических и психологических исследований позволяют предположить, что ослабление (от слабого до умеренного) памяти или снижение скорости мышления может быть связано с постепенным накоплением стандартных анатомических и физиологических изменений мозга, которые сопровождают старение. В противоположность этому слабоумие возникает, по-видимому, в результате более специфических и сильных изменений в группах нейронов и нейронных сетях. Другими словами, в основе старческого слабоумия лежат заболевания, имеющие различные причины и механизмы. Конечно, можно задать вопрос, почему некоторые люди при старении оказываются более восприимчивыми к различным ослабляющим мозг заболеваниям, включая болезнь Альцгеймера. Во многих случаях ответ на этот вопрос не найден.

Поскольку наиболее вероятной причиной ослабления умственной деятельности в старости является болезнь Альцгеймера, мы кратко опишем полученные недавно результаты исследований причин этого заболевания, его распространения у пожилых людей и методы лечения. Прогресс в этих областях весьма заметен именно за последнее время (см. статью: Д. Селко. Амилоидный белок и болезнь Альцгеймера. «В мире науки», 1992, № 1).

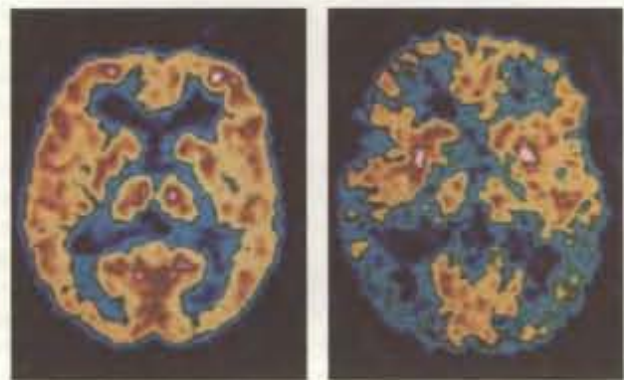
ДО НЕДАВНИХ пор на вопрос о причине болезни Альцгеймера мы были вынуждены отвечать: «не знаем». Но последние успехи, достигнутые



ТКАНЬ МОЗГА 69-летнего человека с классическими признаками болезни Альцгеймера — сенильными бляшками и нейрофибриллярными клубками. Видная на этом препарате бляшка (крупная оранжевая сфера) состоит из β -амилоидного белка и расположенных по периферии поврежденных аксонов и дендритов (темные крючковидные структуры). Клубки, которые состоят из скрученных нитей, заполняют цитоплазму некоторых клеток (темные). Бляшки и клубки появляются также в мозге здоровых стареющих людей, но их значительно меньше и их локализация ограничена.

во многих лабораториях при исследованиях химии и молекулярной биологии β -амилоидных отложений, привели к идентификации первой специфической молекулярной причины этого тяжелого изнурительного заболевания. Проведенные в 1991 г. исследования А. Гоата, Дж. Харди и их коллег из Медицинской школы больницы св. Марии в Лондоне и последующие работы других специалистов позволили установить, что по крайней мере в некоторых случаях в основе этого заболевания лежат специфические мутации в генах.

Эти мутации ДНК ограничены геном, кодирующим предшественник β -амилоидного белка (β -amyloid precursor protein, β -APP). Этот пред-



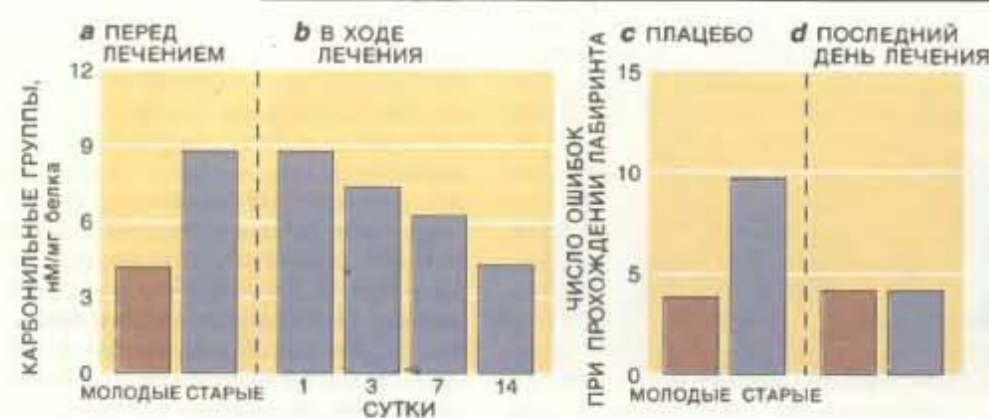
ИЗОБРАЖЕНИЯ, полученные при сканировании мозга с помощью метода позитронной эмиссионной томографии у здоровых пожилых людей (слева) и при болезни Альцгеймера (справа) заметно различаются. Избыток затемнений на изображении справа указывает на нарушение активности мозга.

шественник содержит β -амилоидный белок, который формирует как сенильные бляшки, так и амилоидные отложения в сосудах. Нормальная функция β -APP пока не выяснена, но тем, кто изучает болезнь Альцгеймера, известно, что предшественник производится большинством клеток организма. Мы знаем также, что мутантная форма предшественника ускоряет каким-то образом отложение сегментов β -амилоида в межклеточном пространстве и в кровеносных сосудах. Некоторые мутации могут привести к более выраженному или более быстрому отложению амилоида по сравнению с другими. Ускоренным отложением можно частично объяснить, почему у одних больных симптомы появляются раньше, чем у других.

Значительный вклад в современное понимание этой проблемы внесли исследования синдрома Дауна. Больные с этим синдромом рождаются с тремя копиями 21-й хромосомы (где локализован ген β -APP), а не с двумя копиями, как у нормальных людей. При синдроме Дауна всегда отмечается безвариантное появление множества сенильных бляшек и нейрофибриллярных клубков между 40 и 50 годами жизни. Патологоанатомические исследования больных синдромом Дауна, скончавшихся в ранние годы, выявили немногочисленные аморфные отложения амилоидного белка уже у подростков, т. е. за десятки лет до появления зрелых сенильных бляшек и нейрофибриллярных клубков и клинических признаков слабоумия. На основании этих важных результатов, а также откры-

тия мутаций в β -APP при наследственной болезни Альцгеймера стало ясно, что отложение амилоидного белка может быть причиной некоторых, если не всех, случаев заболевания. Невозможно однозначно объяснить, каким образом инертный сначала белок после длительного периода может вызывать резкие структурные и биохимические изменения в аксонах, дендритах, телах нейронов и в клетках глии, разрушающие мозг при болезни Альцгеймера. Возможно, сам белок так и остается инертным, но, накапливаясь в течение многих лет, он способствует отложению молекул других типов, которые впоследствии могут повреждать окружающие ней-

роны и глию. Согласно другой гипотезе, после достижения критической концентрации амилоидного белка он может непосредственно повреждать окружающие нейроны и глию, делая их более восприимчивыми к слабым повреждающим процессам, которые могут происходить в мозге.



ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕЛКОВ в мозге песчанок показывает, что некоторые возрастные изменения могут быть обратимыми. Дж. Кэрни из Университета Кентукки и Р. Флорид из Фонда медицинских исследований шт. Оклахома обнаружили, что число карбонильных групп в белках мозга (маркер окисления белков) у старых особей (а, голубой столбик) выше, чем у молодых (коричневый столбик). Этот уровень снижается в ответ на прием лекарства, инактиви-

рующего некоторые окисляющие химические соединения (b). Стареющие песчанки, кроме того, хуже преодолевают радиальный лабиринт (c), показанный на фотографии справа. После медикаментозного лечения число ошибок снижается (d). Улучшение кратковременной памяти вселяет надежду, что антиоксиданты могут защищать разум стареющих людей.

рующего некоторые окисляющие химические соединения (b). Стареющие песчанки, кроме того, хуже преодолевают радиальный лабиринт (c), показанный на фотографии справа. После медикаментозного лечения число ошибок снижается (d). Улучшение кратковременной памяти вселяет надежду, что антиоксиданты могут защищать разум стареющих людей.

Единственным действенным «домашним средством» является поддержание физической формы. Р. Дустман и его коллеги из Университета шт. Юта и другие исследователи показали, что пожилые люди, регулярно выполняющие дыхательные упражнения, имеют лучшие результаты в когнитивных тестах, чем старики того же возраста с пониженным аэробным статусом.

процессом у нормальных стареющих людей? Почему эти отложения в основном ограничиваются мозгом, хотя практически все ткани способны синтезировать предшественник амилоида? Какие клетки секретируют вредоносный предшественник амилоида? Почему некоторые нейроны в определенных участках мозга, таких, как гиппокамп, характеризуются высоким содержанием амилоидного белка, тогда как в других участках, например в мозжечке, амилоидные отложения невелики или отсутствуют. И что наиболее важно, как предотвратить эти ужасные нарушения?

В настоящее время все эти вопросы находятся в центре внимания исследователей, как и проблема поддержания и защиты стареющего разума. Ни одно лекарство не может блокировать потенциально разрушительные последствия долгожительства; этот вывод был подтвержден результатами многих клинических испытаний витаминов, минеральных веществ и различных других соединений, которые, как предполагали, должны были «усиливать» биохимические реакции и увеличивать ток крови в мозге. Эти соединения не вызвали или вызвали лишь незначительные улучшения умственной деятельности как при слабоумии, так и при функциональном старении людей.

Столь же неясным остается и влияние на функции мозга ограничений в питании — широко разрекламированное противодействие старению. Показано, что сбалансированная, но низкокалорийная диета может замедлять некоторые связанные с возрастом заболевания и увеличивать продолжительность жизни некоторых низших млекопитающих. В ряде исследований было показано, что у крыс, содержащихся на ограниченном рационе, отмечается меньше нейрохимических



Хотел бы также предостеречь от потребления веществ, включая алкоголь, которые нарушают активность нервной системы. Советую врачам быть осмотрительнее при назначении стареющим пациентам действующих на мозг лекарств. Получены обширные экспериментальные и клинические доказательства того, что больные старше 60 лет особенно чувствительны к бенздиазепинам (таким, как седуксен) и многим другим депрессантам и стимуляторам центральной нервной системы. Пожилые люди страдают более выраженным снижением мотивации по сравнению с молодыми при приеме этих лекарств; кроме того, у пожилых людей отмечается более продолжительный эффект и большая чувствительность к низким дозам. Это нежелательное действие на умственную деятельность оказывается еще более выраженным у лиц, уже подверженных слабоумию.

Продолжается оживленная дискуссия между исследователями о том, может ли поддержание или усиление умственной активности защитить разум в конце жизни. К сожалению, не удается получить однозначных результатов, проливающих свет на эту проблему.

Продолжается оживленная дискуссия между исследователями о том, может ли поддержание или усиление умственной активности защитить разум в конце жизни. К сожалению, не удается получить однозначных результатов, проливающих свет на эту проблему.

изменений в мозге в конце жизни по сравнению с лучше питающимися контрольными животными; при ограничении питания старые крысы более успешно обучаются прохождению через лабиринт.

А. Питерс с коллегами из Медицинской школы Бостонского университета показали также, что содержание крыс на низкокалорийной диете увеличивает продолжительность их жизни до 4 лет, на год больше, чем при обычном питании. У крыс на низкокалорийной диете утрата нейронов и появление возрастных изменений нейронов и глии происходили позднее, чем у крыс контрольной группы. Однако неизбежное появление таких изменений свидетельствовало о том, что контроль за калорийностью пищи может задерживать, но не предотвращать старение мозга.

Никто не может объяснить механизма, благодаря которому ограничение в калорийности приводит к увеличению продолжительности жизни испытываемых животных, как и предсказать степень задержки нарушения умственной деятельности, которые может вызвать низкокалорийная диета у человека. Однако ясно, что для достижения положительного эффекта низкокалорийная диета должна применяться в течение большей части жизни. Внезапное сильное ограничение питания у пожилых людей может привести лишь к появлению симптомов слабоумия. Таким образом, ограничение питания представляется весьма рискованной мерой, особенно в отсутствие контроля со стороны специалистов.

Более «приятной» альтернативой (во всех смыслах) резкому ограничению питания может быть однодневный прием антиоксидантов, таких, как витамин Е. Показано, что этот витамин увеличивает продолжительность жизни и задерживает некоторые системные возрастные заболевания у грызунов, хотя его положительный эффект на старение мозга человека еще не доказан.

НАИБОЛЕЕ разумный подход к разработке методов лечения нарушений умственной деятельности в конце жизни связан с расшифровкой молекулярных механизмов, лежащих в основе слабоумия, и созданием соответствующих лекарств, подавляющих один или более критических этапов заболевания. При болезни Альцгеймера, например, перспективным представляется создание лекарств, направленных на подавление образования β -амилоидного белка из своего предшественника и блокирующих тем самым поступление амилоидного

белка в ткани мозга или же предотвращающих воспалительные и нейротоксические ответы, индуцируемые этим белком. Такое лечение может оказаться также полезным для противодействия слабой и умеренной потере памяти у некоторых пожилых людей на начальных стадиях слабоумия. Перспективность такого лечения вытекает из того факта, что амилоидные бляшки и нейрофибрилярные клубки, характеризующие болезнь Альцгеймера, формируются в тех же участках мозга, ответственных за память и обучение, что и у здоровых людей, хотя в последнем случае образование этих структур незначительно. В настоящее время разрабатывается ряд методов лечения, предотвращающих болезнь Паркинсона, инсульт или его последствия (см. статью: Дж. Зивин, Д. Чой. *Терапия инсульта*, «В мире науки», 1991, № 9).

В течение последующих 30 лет следует ожидать значительного расширения молекулярных и клинических исследований старения мозга в связи с

резким увеличением числа очень старых людей в развитых странах. В США в настоящее время насчитывается 3 млн. жителей в возрасте 85 лет и старше, и к 2020 г. состав этой возрастной группы удвоится. Обнаружение путей блокирования возрастных нарушений высших корковых функций без необходимости увеличения продолжительности жизни, несомненно, поможет многим долгожителям оставаться независимыми и наслаждаться жизнью после своего 80-летия. Неотягощенное функциональными расстройствами старение приведет к важным позитивным экономическим и социальным последствиям, не мыслимым без реализации творческих сил и энергии всех членов общества. К счастью, по крайней мере относительно этих аспектов, у общества будет достаточно резервов для решения таких проблем: ясный ум и жизненный опыт многих из тех, кого мы считаем стариками.

Перевод М. Панова

Наука и общество

Жизнь пришла из-под земли

ТОМАС Гоулд в науке настоящий титан. Наибольшую известность он получил, пожалуй, благодаря гипотезе о происхождении нефти и природного газа. По мнению Гоулда, эти природные ископаемые образовались не из захороненных и разложившихся органических остатков, как считают почти все специалисты, а в результате небиологических процессов, идущих глубоко внутри Земли.

На этот раз Гоулд, работающий научным сотрудником в Корнеллском университете, представил на страницах журнала «Proceedings of the National Academy of Sciences» свою новую гипотезу о том, что жизнь на Земле миллиарды лет назад зародилась не на поверхности планеты, как полагают большинство биологов, а в трещинах горных пород глубоко под поверхностью Земли.

Гоулд считает, что некоторые примитивные микроорганизмы мигрировали на поверхность, где, как он выражается, эволюционировали в амёб, анчоусов и актеров. Но в большинстве своем они все еще обитают под

землей, где их жизнь обеспечивается не солнечным светом и кислородом, а соединениями серы, метаном и другой «высококалорийной пищей». Более того, аналогичные «подземные» сообщества могут существовать внутри других планет (и лун) Солнечной системы.

Гоулд указывает, что большинство здравствующих ныне примитивных организмов относится к анаэробным, термофильным микробам, называемым архебактериями, которые процветают в горячей (до 120°C) среде, лишенной доступа воздуха. Эти организмы были найдены в скважинах на глубинах более 500 м, в горячих источниках на морском дне и в других неожиданных местах. Неудивительно, что самые яркие свидетельства такого рода, на которые ссылается Гоулд, получены при осуществлении проекта глубокого бурения в скальных породах Швеции — проекта, которому он сам дал ход шесть лет назад с целью найти нефть и газ небиологического происхождения. Хотя, по мнению большинства специалистов, эта попытка потерпела неудачу, при бурении, по словам автора гипотезы, были найдены микробы на глубине 5 км.

Более того, Гоулд считает, что 4 млрд. лет назад земные недра были наверняка более благоприятным местом для первичной жизни, чем поверхность, на которую обрушивались астероиды и космическое излучение. А если жизнь зародилась внутри Земли, то почему ей не быть внутри других планет? «Глубоко спрятанная, питающаяся за счет химических процессов жизнь может быть весьма распространена во Вселенной», — говорит Гоулд.

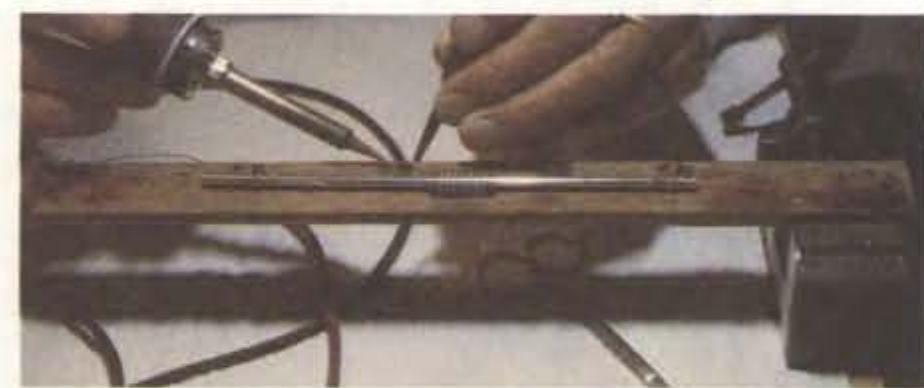
Карл Уоез из Иллинойского университета, известный специалист по архебактериям, аплодирует Гоулду, по крайней мере его земной части гипотезы. «Теории в области микробиологии и проблемы происхождения жизни подвергаются постоянным модификациям, — говорит он, — поэтому границы наших предположений пора расширить». Однако, как говорит Уоез, гипотеза Гоулда о том, что жизнь может существовать также в недрах других планет, «выходит за рамки моих представлений».

Джон Хорган

Серебро + керамика = чудо техники

ТВОРЧЕСКАЯ прозорливость до сих пор не часто озаряла ученых, работающих в области высокотемпературной сверхпроводимости и пытающихся сделать из хрупких керамических материалов пригодные для практических целей электрические провода. Но, кажется, озарение, наконец, снизошло на специалистов Технологического центра по проблемам сверхпроводимости при Национальной лаборатории в Лос-Аламосе (шт. Нью-Мексико).

Ученые этого центра работали над усовершенствованием придуманного ими ранее нового метода изготовления проводов. Они закладывали порошок сверхпроводящей керамики в серебряную трубку, а затем вытягивали ее при нагреве. В результате оба материала спекались и получалась твердая нить. К сожалению, полученный ими провод имел те же недостатки, которые были присущи всем другим сверхпроводящим нитям, получаемым другими способами. Чтобы проводить электрический ток без сопротивления, такой провод должен был иметь толстую негибкую рубашку с жидким азотом для охлаждения. Упомянутым ученым также не удалось решить самую сложную проблему — хрупкость провода. Сжатие нити и придание ей формы ленты позволили повысить прочность, но все же



СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПРОВОД, изготовленный в Национальной лаборатории в Лос-Аламосе, обладает многими достоинствами благодаря его трубчатой геометрии. (Фото: Фред Рик.)

полученный учеными провод был еще далек от возможности его широкого применения.

«Неожиданно нас осенила идея: вернуть нанизнанку набитую порошковую трубку», — вспоминает Д. Петерсон, директор упомянутого центра. Вместо того чтобы набивать трубку сверхпроводящим порошком, Петерсон и его коллеги Д. Коржеква, Дж. Бингерт и Х. Шейнберг решили использовать керамику как покрытие. При таком способе они достигали повышенной прочности изделия за счет использования механических свойств трубки и получали внутри канал, который можно было заполнять кладгентом. Для защиты полупроводникового покрытия ученые решили поверх надеть еще одну серебряную трубку; все три слоя спекались с помощью термообработки, и длина провода увеличивалась при вытяжке. «Пока мы не получили первый образец, мы только вынашивали идею, и мы еще не знали, окажется ли она плодотворной», — сказал Бингерт.

Сейчас ученые убеждены, что придуманная ими трехслойная трубчатая структура позволит получить более прочный и более простой по конструкции провод, который, судя по всему, окажется пригодным для практического использования. За счет наличия металлических слоев, защищающих керамику снаружи и изнутри, сверхпроводящий слой должен выдерживать механические нагрузки при транспортировке и прокладке. В отличие от твердотельных проводов и лент, разрыв в которых может возникнуть от удара, трещины в новом сверхпроводящем проводе должны образоваться по всей окружности, чтобы ток перестал течь.

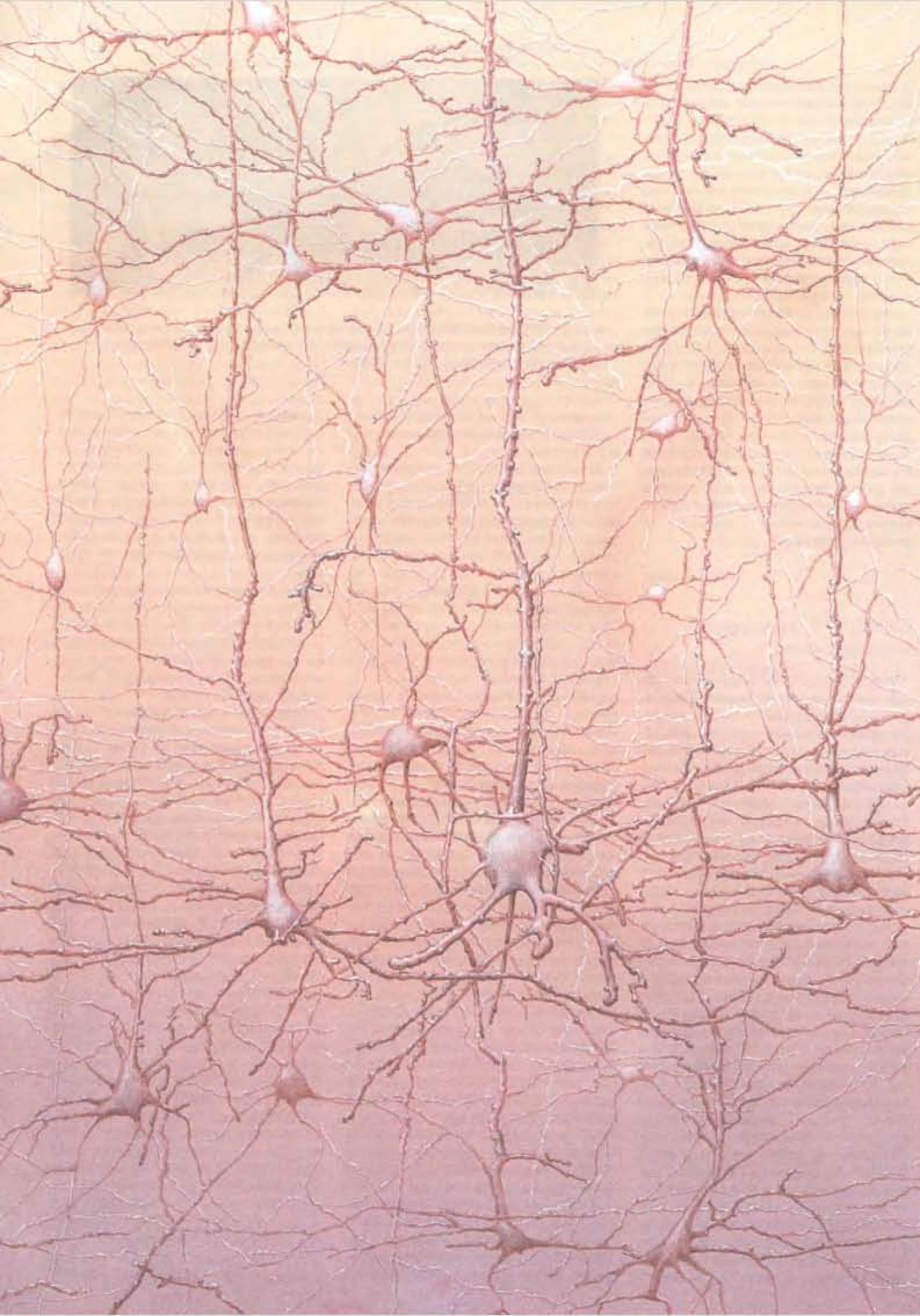
Изобретатели нового провода надеются увеличить токопроводящую способность за счет создания концентрических слоев, подобных кольцам в стволе дерева. «Потенциально

мы можем сделать провод длиной несколько километров и любого диаметра», — говорит Петерсон. Однако, как замечает он, соединение отдельных участков многослойного провода может представлять серьезную проблему, поскольку любое нарушение соосности в проводе приведет к большим энергетическим потерям.

По словам главного научного сотрудника лос-аламосского Технологического центра Дж. Смита, своим успехом изобретение ученых обязано их удачному выбору керамики на основе висмута, названной ими биско. Когда исследователи экспериментировали с порошками керамики на основе иттрия, серебро плавилось еще до того, как керамический материал успевал образовать планарную структуру, необходимую для сверхпроводимости. Другие металлы, такие, как золото, медь, сталь и платина, при использовании в структуре с керамикой биско не проявляли свойства сверхпроводимости. «То, что серебро так удачно сочетается с биско, — это подарок природы», — заявил Смит.

Новые трубчатые проводники, как говорят их изобретатели, могут найти самое широкое применение — от проводов, подводящих ток к мощным миниатюрным двигателям, до обмоток сверхпроводящих магнитов, используемых в транспортных средствах на воздушной подушке. «Мы думаем, что у промышленных компаний появятся другие идеи как в отношении использования новых сверхпроводящих проводов, так и в отношении их технического совершенствования», — говорит Коржеква. Если это новое достижение будет успешно внедрено в практику, то можно не сомневаться, что сверхпроводящие провода, о которых давно мечтали, будут встречаться повсюду.

Дебора Эрикссон



Как обучаются нейронные сети

Сети из искусственных нейронов способны научиться представлять сложную информацию. Не исключено, что они помогут лучше понять, как обучается человеческий мозг

ДЖЕФФРИ Е. ХИНТОН

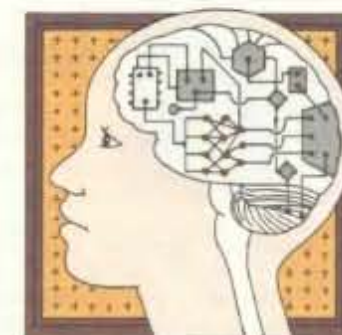
МОЗГ — это своего рода замечательный компьютер. Он с невероятной быстротой интерпретирует неточную информацию, поступающую от органов чувств: различает шепот в шумной комнате, лишь в полутемном переулке, улавливает скрытый смысл в политическом заявлении. И что самое удивительное, мозг обучается (без каких-либо явных указаний) создавать внутренние представления, благодаря которым и проявляет перечисленные способности.

Пока мы многого не знаем относительно того, каким образом мозг обучается обрабатывать информацию, поэтому существует множество теорий на этот счет. Чтобы проверить эти гипотезы, мои коллеги и я, создавая сети из искусственных нейронов, пытались моделировать процессы обучения, протекающие в мозге. Мы конструируем нейронные сети, чтобы сначала определить основные свойства как самих нейронов, так и их соединений, а затем программируем компьютер для моделирования этих свойств.

Поскольку наши знания о нейронах далеко не полны, а вычислительные мощности ограничены, создаваемые модели могут быть лишь грубым приближением к реальным нейронным сетям. Конечно, мы до хрипоты спорим о том, какие свойства наиболее существенны для моделирования нейронов. Выявляя эти свойства в искусственных нейронных сетях, мы добились немалых успехов в опровержении всевозможных теорий, описывающих, как мозг обрабатывает информацию. Модели начинают также проливать свет на то, каким образом мозг обретает столь высокую способность к самообучению.

В человеческом мозге нейрон обычно получает сигналы от других нейронов посредством множества коротких отростков, называемых дендритами. Клетка посылает сигналы в виде всплеск электрической активности вдоль длинного, тонкого волокна, называемого аксоном и имеющего тысячи ответвлений. На конце каждой ветви структура, называемая синапсом, преобразует активность, поступающую по аксону, в электрическое воздействие, которое либо подавляет, либо возбуждает активность в связанных с ним клетках. Когда нейрон получает возбуждающий сигнал, достаточно большой по сравнению с тормозным (подавляющим) сигналом, он посылает электрический импульс по своему аксону. Обучение происходит путем изменения эффективности синапсов, так что влияние одного нейрона на другой меняется.

Искусственные нейронные сети обычно состоят из



взаимосвязанных «элементов», являющихся моделями нейронов. Функция синапса моделируется изменяемым весовым параметром, ассоциированным с каждым соединением. Большинство искусственных сетей не отражает реальной геометрии дендритов и аксонов и представляет электрический выход нейрона в виде одного числа, которое соответствует частоте срабатывания нейрона — уровню его активности.

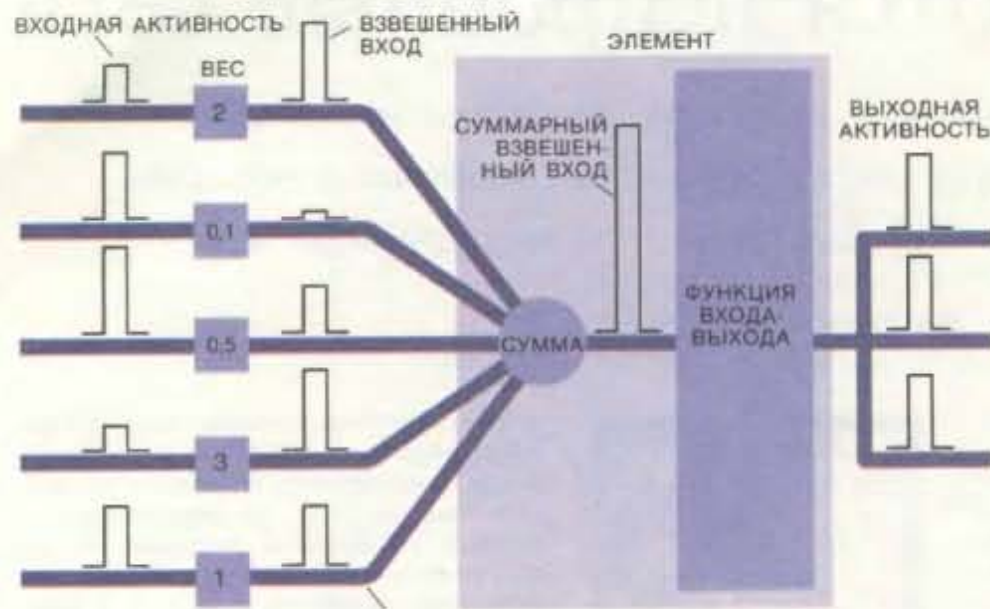
Каждый элемент преобразует получаемые паттерны активностей в единственную выходную активность, которую он передает на другие элементы. Это преобразование совершается за два шага. Сначала элемент умножает каждый входной сигнал на вес соответствующей связи и складывает все взвешенные таким образом входы, получая так называемый суммарный вход. Затем элемент пользуется функцией входа-выхода, которая превращает суммарный вход в выходную активность (см. статью в рубрике «Наука вокруг нас» на с. 200).

Поведение искусственной нейронной сети зависит как от значения весовых параметров, так и от функции входа-выхода, заданной для элементов сети. Обычно эта функция относится к одной из трех категорий: линейной, пороговой или сигма-функции. Для линейных элементов выходная активность пропорциональна суммарному взвешенному входу. Для пороговых элементов выход устанавливается на одном из двух уровней в зависимости от того, больше или меньше суммарный вход некоторого порогового значения. Для сигмоидальных элементов выход варьируется непрерывно, но не линейно, по мере изменения входа. Сигмоидальные элементы имеют больше сходства с реальными нейронами, чем линейные или пороговые, но любой из этих типов можно рассматривать лишь как грубое приближение.

Чтобы создать нейронную сеть для решения какой-либо конкретной задачи, мы должны выбрать, каким образом следует соединять нейроны друг с другом, и соответствующим образом подобрать значения весовых параметров на этих связях. Может ли влиять один элемент на другой, зависит от установленных соединений. Веса определяют силу влияния.

Наиболее распространенный тип искусственной нейронной сети состоит из трех групп, или слоев, элементов: слоя входных элементов, соединенного со слоем «скрытых» элементов, который в свою очередь соединяется со слоем выходных элементов. Активность входных элементов представляет собой исходную информацию, подаваемую на сеть. Активность каждого скрытого элемента определяется сигналами от входных элементов и весами на связях между входными и скрытыми элементами. Аналогичным образом поведение выходных элементов зависит от активности скрытых элементов и весов на связях между скрытыми и выходными элементами.

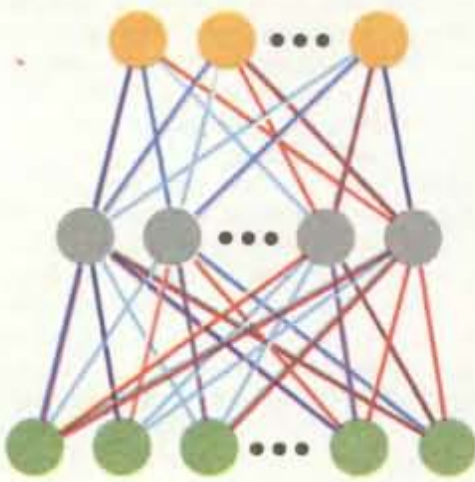
СЕТЬ НЕЙРОНОВ в головном мозге обеспечивает способность человека усваивать информацию. Позволит ли моделирование таких сетей раскрыть механизмы, лежащие в основе обучения?



ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ НЕЙРОН обрабатывает нервные сигналы, представляющие собой электрическую активность. Каждый входной сигнал умножается на число, называемое весом. «Элемент» складывает все взвешенные входы. Затем он вычисляет выходной сигнал, пользуясь функцией соотношения входа-выхода.

Этот простой тип сети интересен тем, что скрытые элементы вольны строить свои собственные представления о входной информации. Веса между входными и скрытыми элементами определяют, в каких случаях каждый скрытый элемент будет активным, и поэтому, модифицируя эти веса, скрытый элемент может выбирать, что он представляет.

Мы можем научить трехслойную сеть решать определенную задачу, пользуясь следующей процедурой. Сначала мы предъявляем сети серию тренировочных примеров, которые состоят из паттерна активностей



ОБЫЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ состоит из трех слоев элементов, которые связаны друг с другом. Активность распространяется от входных элементов (зеленые) к скрытым элементам (серые) и, наконец, к выходным (желтые). Разные цвета связей соответствуют различным весам.

стей входных элементов вместе с желаемым паттерном активностей выходных элементов.

Предположим, что мы хотим научить сеть распознавать рукописные цифры. Можно воспользоваться матрицей, скажем, из 256 сенсоров, каждый из которых регистрирует присутствие или отсутствие чернильного пятнышка в пределах маленькой площадки — фрагмента одной цифры. Для сети, таким образом, потребуется 256 входных элементов (по одному на каждый сенсор), 10 выходных элементов (по одному на каждую возможную цифру) и некоторое количество скрытых элементов. Для каждой цифры, регистрируемой сенсорами, сеть должна генерировать высокую активность в соответствующем выходном элементе и низкую в остальных выходных элементах.

Чтобы натренировать систему, мы предъявляем ей изображение цифры и сравниваем действительную активность на 10 выходных элементах с желаемой активностью. Затем мы подсчитываем ошибку, определяемую как квадрат разности между действительным и желаемым выходом. После этого мы изменяем вес каждой связи, с тем чтобы уменьшить ошибку. Описанный процесс тренировки мы повторяем со многими различными написаниями каждой цифры, пока сеть не научится правильно распознавать все возможные изображения.

Чтобы реализовать эту процедуру, нам нужно изменять каждый вес на величину, пропорциональную ско-

рости, с которой изменяется ошибка по мере изменения веса. Эта величина (называемая производной ошибки по весу и обозначаемая EW) вычисляется не просто. Один из способов вычисления EW заключается в том, чтобы изменить вес на очень маленькую величину и посмотреть, как изменится ошибка. Однако этот метод не эффективен, поскольку требует отдаленных вариаций для каждого из многих весов.

Примерно в 1974 г. Поль Дж. Вербос изобрел значительно более эффективную процедуру для вычисления EW , когда работал над своей докторской диссертацией в Гарвардском университете. Процедура, известная теперь как алгоритм обратного функционирования (back propagation algorithm), стала одним из наиболее важных инструментов в обучении нейронных сетей.

Алгоритм обратного функционирования проще всего понять, когда все элементы сети линейны. Алгоритм вычисляет каждую EW , сначала вычисляя EA — скорость, с которой изменяется ошибка при изменении уровня активности элемента. Для выходных элементов EA является просто разностью между действительным и желаемым выходом. Чтобы вычислить EA для скрытого элемента в слое, непосредственно предшествующем выходному слою, мы сначала идентифицируем все веса между этим скрытым элементом и выходными элементами, с которыми соединен данный скрытый элемент. Затем мы умножаем эти веса на величины EA для этих выходных элементов и складываем полученные произведения. Эта сумма и равна EA для данного скрытого элемента. Вычислив EA для всех элементов скрытого слоя, прилегающего к выходному, мы можем аналогичным образом рассчитать EA и для других слоев, перемещаясь в направлении, обратном тому направлению, в котором активность нейронов распространяется по сети. Отсюда и название алгоритма обратного прослеживания (или обратного распространения). После того как значение EA для элемента вычислено, подсчитать EW для каждой входной связи элемента уже несложно. Величина EW является произведением EA и активности во входной цепи.

Для нелинейных элементов алгоритм обратного функционирования включает дополнительный шаг. Перед перемещением в обратном направлении EA необходимо преобразовать в EI — скорость, с которой изменяется ошибка по мере измене-

ния суммарного входа элемента. (Подробно процедура этих расчетов описана в рамке на с. 106.)

НА ПРОТЯЖЕНИИ нескольких лет после его изобретения алгоритм обратного функционирования оставался почти незамеченным, вероятно, потому, что не был в должной мере оценен специалистами. В начале 80-х годов Д. Румельхарт, работавший в то время в Калифорнийском университете в Сан-Диего, и Д. Паркер из Станфордского университета независимо друг от друга вновь открыли алгоритм. В 1986 г. Румельхарт, Р. Уильямс, также из Калифорнийского университета в Сан-Диего, и я продемонстрировали способность алгоритма обучить скрытые элементы вырабатывать интересные представления для сложных паттернов на входе и тем самым сделали его известным.

Алгоритм обратного функционирования оказался на удивление эффективным в обучении сетей со многими слоями решению широкого класса задач. Но более всего он эффективен в ситуациях, когда отношения между входом и выходом нелинейны, а количество обучающих данных велико. Применяя алгоритм, исследователи создали нейронные сети, способные распознавать рукописные цифры, предсказывать изменения валютного курса и оптимизировать химические процессы. Они даже воспользовались алгоритмом для обучения сетей, которые идентифицируют переродившиеся предраковые клетки в анализируемых образцах ткани и регулируют положение зеркал в телескопах, чтобы исключить атмосферные искажения.

Р. Андерсен из Массачусетского технологического института и Д. Зипсер из Калифорнийского универ-

ситета в Сан-Диего показали, что алгоритм обратного функционирования представляет собой весьма эффективный инструмент для понимания функций некоторых нейронов в коре головного мозга. Они научили нейронную сеть реагировать на зрительные стимулы, применив алгоритм обратного функционирования. Затем они обнаружили, что реакция скрытых элементов удивительно схожа с реакцией реальных нейронов, выполняющих преобразование зрительной информации, поступающей от сетчатки, в форму, необходимую для более глубоких областей мозга, перерабатывающих зрительную информацию.

Тем не менее метод обратного функционирования как теория, способная объяснить, каким образом происходит обучение в реальных нейронах, оценивается неоднозначно. С одной стороны, алгоритм об-

Как нейронные сети представляют рукописные цифры

Нейронная сеть, состоящая из 256 входных элементов, 9 скрытых и 10 выходных элементов, была обучена распознаванию рукописных цифр. Здесь изображена активность элементов, когда сети предъявляют рукописную цифру 3. Третий элемент на выходе наиболее активен. Девять панелей справа представляют 256 входных весов и 10 выходных весов для каждого из девяти скрытых элементов. Красным цветом выделены веса возбуждающих связей, желтым — веса тормозящих связей.



ратного функционирования внес ценный вклад на абстрактном уровне. Он достаточно хорош при создании представлений о воспринимаемом в скрытых элементах сети. В результате исследователи приобрели некоторую уверенность в процедурах обучения, в которых веса постепенно изменяются, чтобы уменьшить ошибки. Раньше многие ученые полагали, что подобные методы окажутся безнадежными, поскольку должны неизбежно приводить к локально оптимальным, но в более широком масштабе ужасным решениям. Например, сеть для распознавания цифр может устойчиво сходиться к набору весов, при котором она будет путать единицы с семерками, хотя существует набор весов, позволяющий различать эти цифры наряду с другими. Из-за опасений

подобного рода распространилось убеждение, что процедура обучения представляет интерес только в том случае, если она гарантирует сходимость к глобально оптимальному решению. Метод обратного функционирования показал, что для многих задач глобальная сходимость не является необходимым условием для того, чтобы достичь хороших результатов.

С другой стороны, с биологической точки зрения метод обратного функционирования выглядит не очень убедительным. Наиболее очевидная трудность заключается в том, что информация должна проходить по тем же самым связям в обратном направлении, от каждого последующего уровня к предыдущему. Ясно, что этого не происходит в реальных нейронах. Однако этот до-

вод на самом деле является довольно поверхностным. В мозге существует множество путей, ведущих от следующих слоев нервных клеток к предыдущим, и эти пути могут использоваться многообразными способами для передачи информации, необходимой для обучения.

Более серьезную проблему представляет быстрое действие алгоритма обратного функционирования. Здесь центральным является вопрос о том, как быстро растет время, необходимое для обучения, по мере возрастания размеров сети. Время, требующееся для вычисления производных от ошибки по весам на заданном тренировочном примере, пропорционально размерам сети, поскольку объем вычислений пропорционален количеству весов. Однако более крупные сети требуют

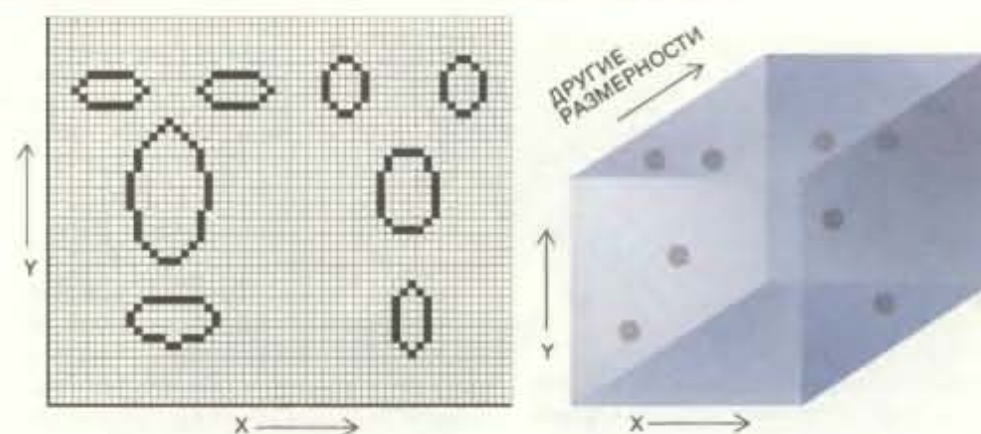
большого количества тренировочных примеров, и им приходится модифицировать веса большее число раз. Следовательно, время обучения растет значительно быстрее, чем размеры сети.

Самое серьезное возражение попытке рассматривать обратное функционирование как модель обучаемости реальных систем заключается в том, что оно требует учителя, предоставляющего желаемый выход для каждого тренировочного примера. В отличие от этого человек обучается большинству вещей без помощи учителя. Никто не дает нам детального описания внутренних представлений мира, которые мы должны научиться извлекать из нашего сенсорного входа. Мы учимся понимать речь или зрительные сцены без каких-либо прямых инструкций.

Каким образом сеть может обучиться адекватным внутренним представлениям, если сначала она не имеет никаких знаний и никакого учителя? Если сеть сталкивается с большим набором сочетаний сигналов, но не имеет никакой информации о том, что с ними следует делать, то, очевидно, перед ней нет четко поставленной задачи. Тем не менее исследователи разработали несколько универсальных, неконтролируемых процедур, которые могут правильно регулировать весовые параметры сети.

Все эти процедуры имеют два общих качества: они оперируют, явно или неявно, с некоторым понятием качества представления и работают, изменяя веса, чтобы повысить качество представления, вырабатываемого скрытыми элементами.

ВООБЩЕ говоря, хорошее представление — это такое представление, которое можно очень экономно описать, но которое содержит тем не менее достаточное количество информации, чтобы можно было довольно точно воспроизвести входные данные. Рассмотрим, например, изображение, состоящее из нескольких эллипсов. Предположим, что некоторое устройство преобразует изображение в миллион крошечных квадратиков, каждый из которых может быть либо светлым, либо темным. Изображение может быть представлено просто положениями темных квадратиков. Однако возможны и другие, более эффективные представления. Эллипсы различаются только пятью особенностями: ориентацией, положением по вертикали, положением по горизонтали, длиной и шириной. Таким об-



ДВА ЛИЦА, составленные из восьми эллипсов, могут быть представлены таким же числом точек в двух измерениях. Но поскольку эллипсы отличаются друг от друга только пятью характеристиками — ориентацией, положением по вертикали, положением по горизонтали, длиной и шириной, — эти два лица можно представить и по-другому: как восемь точек в пятимерном пространстве.

разом, изображение можно описать, пользуясь лишь пятью параметрами на каждый эллипс.

Хотя для описания эллипса пятью параметрами требуется больше битов, чем для описания одной темной клетки двумя координатами, в итоге мы получаем большую экономию, поскольку параметров нужно меньше, чем координат. Кроме того, мы

не теряем информации, описывая эллипсы через их параметры: при желании по ним мы можем восстановить исходное изображение.

Почти все неконтролируемые процедуры обучения можно рассматривать как методы минимизации суммы двух членов, затрат на кодирование и затрат на восстановление. Затраты на кодирование — это ко-

Алгоритм обратного функционирования

Чтобы обучить нейронную сеть решению какой-либо задачи, мы должны подправлять веса каждого элемента таким образом, чтобы уменьшалась ошибка — расхождение между действительным и желаемым выходом. Для этого нужно, чтобы нейронная сеть вычисляла производную от ошибки по весам (EW). Другими словами, она должна вычислять, как изменяется ошибка при небольшом увеличении или уменьшении каждого веса. Чаще всего для вычисления EW применяется алгоритм обратного функционирования.

Чтобы реализовать этот алгоритм, мы сначала должны дать математическое описание нейронной сети. Предположим, что элемент j — типичный элемент выходного слоя, а элемент i — типичный элемент слоя, который предшествует выходному. Активность элемента выходного слоя определяется двухшаговой процедурой. Сначала вычисляется суммарный взвешенный вход x_j с помощью формулы

$$x_j = \sum_i y_i w_{ij},$$

где y_i — уровень активности i -го элемента в предшествующем слое и w_{ij} — вес связи между i -м и j -м элементами.

Далее, элемент вычисляет активность y_j с помощью некоторой функции от суммарного взвешенного входа. Обычно применяется сигма-функция:

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-x_j}}$$

После того как активности всех выходных элементов определены, сеть вычисляет ошибку \mathcal{L} , которая определяется выражением

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \sum_j (y_j - d_j)^2,$$

где y_j — уровень активности j -го элемента в верхнем слое, а d_j — желаемый выход j -го элемента.

Алгоритм обратного функционирования состоит из четырех шагов.

1. Вычислить, насколько быстро меняется ошибка при изменении выходного элемента. Эта производная

ошибки (EA) есть разность между действительной и ожидаемой активностью.

$$EA_j = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_j} = y_j - d_j.$$

2. Вычислить, насколько быстро изменяется ошибка по мере изменения суммарного входа, получаемого выходным элементом. Эта величина (EI) есть результат шага 1, умноженный на скорость изменения выхода элемента с изменением его суммарного входа.

$$EI_j = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_j} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_j} \frac{dy_j}{dx_j} = EA_j y_j (1 - y_j).$$

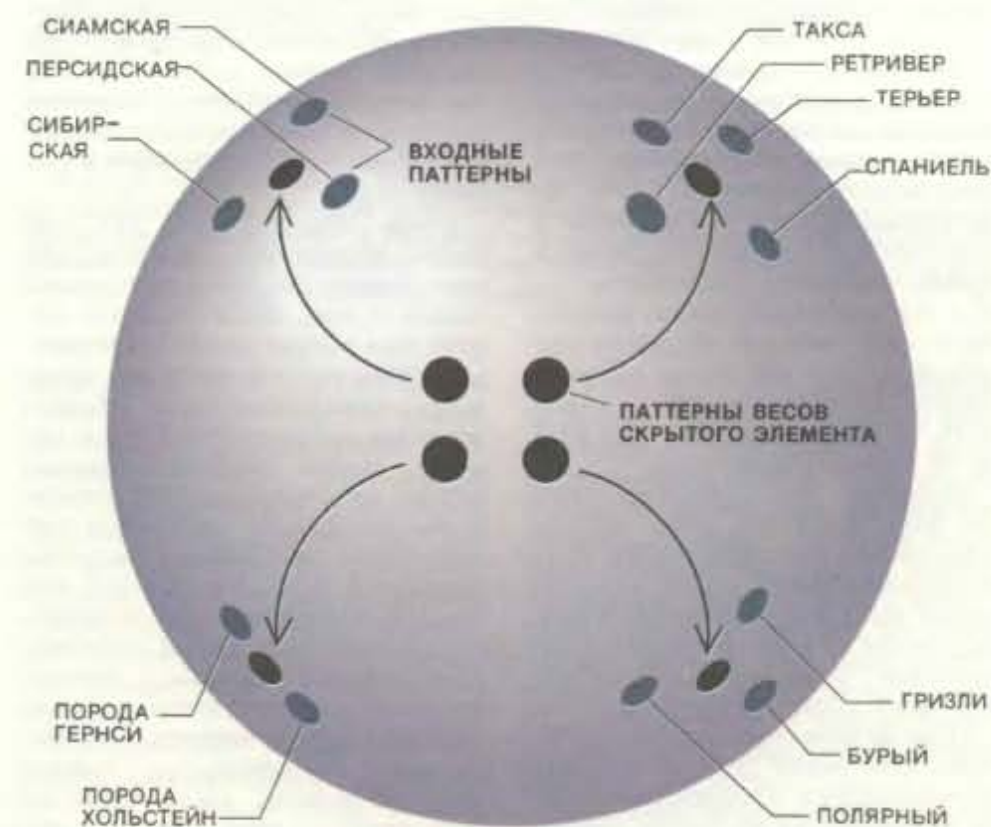
3. Вычислить, как быстро изменяется ошибка по мере изменения веса на входной связи выходного элемента. Эта величина (EW) есть результат шага 2, умноженный на уровень активности элемента, из которого исходит связь.

$$EW_{ij} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial w_{ij}} = EI_j y_i.$$

4. Вычислить, как быстро изменяется ошибка с изменением активности элемента из предыдущего слоя. Этот ключевой шаг позволяет применять обратное функционирование к многослойным сетям. Когда активность элемента из предыдущего слоя изменяется, это влияет на активности всех выходных элементов, с которыми он связан. Поэтому, чтобы подсчитать суммарное воздействие на ошибку, мы складываем все эти воздействия на выходные элементы. Но эти воздействия нетрудно подсчитать. Это результат шага 2, умноженный на вес связи к соответствующему выходному элементу.

$$EA_i = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_i} = \sum_j \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial y_i} = \sum_j EI_j w_{ij}.$$

Пользуясь шагами 2 и 4, мы можем преобразовать величины EA одного слоя элементов в EA предыдущего слоя. Эту процедуру можно повторять, чтобы вычислять EA столько предыдущих слоев, сколько их есть. Зная EA для элемента, мы можем воспользоваться шагами 2 и 3, чтобы вычислить EW на его выходных связях.



КОНКУРЕНТНОЕ ОБУЧЕНИЕ можно представить себе как процесс, в котором каждый паттерн на входе притягивает к себе паттерн весов ближайшего скрытого элемента. Каждый входной паттерн представляет набор отличительных признаков. Паттерны весов скрытых элементов подвергаются изменениям, так чтобы они медленно мигрировали к ближайшему набору входных паттернов. Таким образом, каждый скрытый элемент учится представлять кластер сходных входных паттернов.

ПОПУЛЯЦИОННОЕ КОДИРОВАНИЕ представляет собой многопараметрический объект в виде зоны активности на многих скрытых элементах. На этом рисунке дисками обозначены неактивные скрытые элементы, а цилиндры — активные, причем высота цилиндра соответствует уровню активности элемента.

кой же, как вход, здесь не требуется никакого учителя.

Многие исследователи, включая Р. Линскера из Исследовательского центра им. Томаса Дж. Уотсона компании IBM и Э. Оя из Технологического университета в Лаппенранте (Финляндия), открыли альтернативные алгоритмы для обучения по принципиальным компонентам. С биологической точки зрения эти алгоритмы более состоятельны, поскольку не требуют выходных элементов или обратного функционирования. Вместо этого, чтобы определить необходимое изменение веса, они используют корреляции между активностью скрытого элемента и активностью входного элемента.

личество битов, необходимое для того, чтобы описать несоответствие между исходной информацией и наилучшим ее представлением, которое можно восстановить по активностям скрытых элементов. Затраты на восстановление пропорциональны квадрату разности между входными данными и их восстановленным представлением.

Существуют два простых метода отыскания экономного кода, позволяющие довольно точно воспроизвести входные данные: обучение по принципиальным компонентам и конкурентное обучение. При обоих подходах мы сначала определяем, насколько экономным должно быть кодирование, а затем модифицируем веса в сети, чтобы минимизировать ошибку восстановления.

В основе стратегии обучения по принципиальным компонентам лежит идея о том, что если активности пар входных элементов каким-то образом коррелируют, то не стоит напрасно расходовать биты на отдельное описание активностей каждого входного элемента. Более эффективный подход заключается в том, чтобы выделить и описать принципиальные компоненты — т. е. компоненты вариации, разделяемые сразу многими входными элементами. Если мы хотим выявить, скажем, 10 принципиальных компонент, то нам нужен лишь один слой из 10 скрытых элементов.

Поскольку такие сети представляют вход, пользуясь лишь небольшим числом компонент, затраты на кодирование низки. И так как вход может быть восстановлен достаточно хорошо по принципиальным компонентам, затраты на восстановление также остаются низкими.

Один из возможных способов обучения сети такого типа — заставить ее восстановить аппроксимацию входа на множестве выходных элементов. Затем можно воспользоваться методом обратного функционирования, чтобы минимизировать разницу между действительным и желаемым выходом. Этот процесс напоминает контролируемое обучение, но, поскольку желаемый выход точно та-

когда нейронная сеть использует метод обучения по принципиальным компонентам, небольшое число скрытых элементов объединяется для представления паттерна входных сигналов. В отличие от этого при конкурентном обучении большое число скрытых элементов вступает в соревнование, так чтобы один скрытый элемент представлял данное сочетание входных сигналов. Выбирается тот скрытый элемент, чьи входные веса ближе всего к паттерну входов.

Теперь предположим, что нам нужно восстановить входной паттерн только на основании нашего знания о том, какой скрытый элемент был выбран для их представления. Очевидно, для этого нам лучше всего скопировать паттерн входных весов для выбранного скрытого элемента. Чтобы свести к минимуму ошибку восстановления, мы должны будем еще больше приблизить паттерн весов выбранного скрытого элемента к входному паттерну данных. По такому принципу и работает конкурентный метод обучения. Если сети представлены с тренировочными данными, которые можно сгруппировать в кластеры сходных входных паттернов, то каждый скрытый элемент учится представлять какой-то один кластер и его входные веса сходятся к центру этого кластера.

Как и алгоритм обучения по принципиальным компонентам, конкурентное обучение минимизирует затраты на восстановление, поддерживая низкими затраты на кодиро-

вание. Мы можем позволить себе ввести большое число скрытых элементов, поскольку даже при миллионе элементов достаточно 20 бит, чтобы указать, какой из них вышел победителем.

В начале 80-х годов Т. Кохонен из Хельсинского университета ввел важную модификацию в алгоритм конкурентного обучения. Он показал, как можно заставить физически прилегающие друг к другу скрытые элементы научиться представлять сходные входные паттерны. Алгоритм Кохонена настраивает не только веса выигрывающего скрытого элемента, но и веса его близких соседей. Способность алгоритма картировать сходные входные паттерны на близких скрытых элементах дает основания предполагать, что и мозг пользуется процедурой подобного рода при создании топографических карт, обнаруженных в зрительной коре головного мозга (см. статью Семира Зеки «Зрительный образ в сознании и в мозге», с. 33).

Алгоритмы неконтролируемого обучения можно классифицировать по типу создаваемого ими представления. В методах обучения по принципиальным компонентам скрытые элементы объединяются, и представление каждого входного паттерна распределяется по всем скрытым элементам. В конкурентных методах скрытые элементы противодействуют друг другу, и представление входного паттерна локализовано внутри выбранного скрытого элемента. До недавнего времени работы по неконтролируемому обучению основывались либо на одном, либо на другом из этих методов, возможно, потому, что они приводили к простым правилам изменения весов. Однако наиболее интересные и мощные алгоритмы, вероятно, лежат где-то между двумя крайними подходами с чисто распределенными и чисто локализованными представлениями.

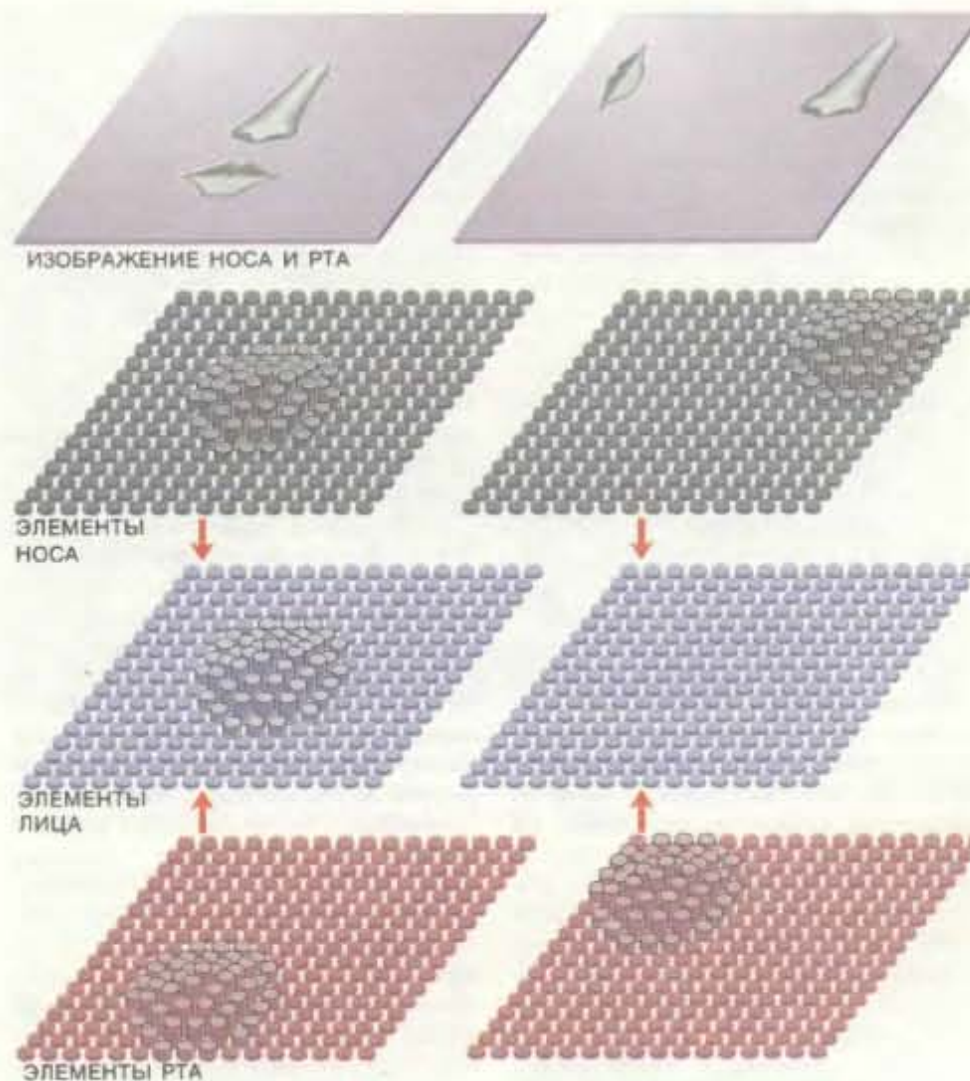
Х. Барлоу из Кембриджского университета предложил модель, в которой каждый из скрытых элементов редко находится в активном состоянии и представление каждого входного паттерна распределяется по небольшому числу выбранных скрытых элементов. Совместно со своими коллегами он показал, что его типу кодирования можно обу-

чить, препятствуя объединению скрытых элементов и обеспечивая в то же время условия, при которых скрытый код позволяет восстанавливать входные данные.

К сожалению, для большинства современных методов минимизации затрат на кодирование характерна тенденция устранять любую избыточность в активностях скрытых элементов. В результате сеть оказывается очень чувствительной к ситуациям, в которых один-единственный нейрон срабатывает неправильно. Эта черта не свойственна мозгу, работа которого обычно не страдает сколько-нибудь серьезно в результате потери нескольких нейронов.

Похоже, что мозг пользуется подходом, известным как популяционное кодирование, в рамках которого информация представляется целой популяцией активных нейронов. Это свойство было блестяще продемонстрировано в экспериментах Д. Спаркса и его коллег из Университета штата Алабама. Анализируя, каким образом мозг обезьяны управляет движением ее глаз, они пришли к выводу, что требуемое движение кодируется целой популяцией клеток, каждая из которых представляет слегка отличное от других движение. Движение, совершаемое в конечном итоге глазом, соответствует среднему по всем движениям, закодированным активными клетками. Если анестезировать какое-то число мозговых клеток, глаз перемещается в положение, являющееся средним по оставшимся активным клеткам. Популяционным кодированием можно воспользоваться не только для движения глаз, но и для черт лица, как показали М. Янг и С. Ямане из японского института RIKEN в своих недавних экспериментах с височной корой мозга обезьяны.

КАК ПРИ РЕГУЛЯЦИИ движений глаз, так и для черт лица мозг должен представлять объекты, изменяющиеся во многих измерениях. В случае с движениями глаз мы имеем дело только с двумя измерениями, но для лица включаются и такие измерения, как выражение на нем удовольствия, наличие волос, знакомое оно или нет, а также пространственные параметры, такие, как положение, размеры и ориентация. Если ассоциировать с каждой чувствительной к лицам клеткой параметры лица, которые приводят ее в наиболее активное состояние, мы можем осреднить эти параметры по всей популяции активных клеток, чтобы выявить параметры лица,



ЗОНЫ АКТИВНОСТИ на множестве скрытых элементов представляют изображение носа и рта. Эти популяционные коды обуславливают зоны активности в лицевых элементах, если нос и рот находятся в правильных пространственных отношениях (слева). Если это не так, активные элементы носа попытаются образовать зону активности у соответствующих лицевых элементов в одном месте, а элементы рта — в другом. В результате входная активность лицевых элементов не превысит порогового значения и на них не образуются зоны активности (справа).

представляемого популяционным кодом. Говоря абстрактно, каждая чувствительная к лицам клетка представляет какую-то определенную точку в многомерном пространстве возможных лиц, и любое лицо может быть представлено при активации всех клеток, кодирующих очень похожие лица, так что в многомерном пространстве всех возможных лиц появляется целая область активности.

Популяционное кодирование выглядит привлекательно, потому что оно работает, даже когда какая-то часть нейронов повреждена. Причина такой устойчивой работы заключается в том, что потеря произвольного подмножества нейронов оказывает малое влияние на популяцию нейронов в целом. Те же рассуждения можно отнести и к случаю, когда система принимает реше-

ние в спешке и несколько нейронов не успевают принять участие в процессе. Нейроны передают друг другу информацию, посылая дискретные импульсы, называемые потенциалами действия, и на протяжении очень короткого периода времени многие «активные» нейроны могут не успеть послать сигнал. Тем не менее даже за такие короткие периоды популяционный код в одной части мозга может обусловить приблизительно правильный популяционный код в другой его части.

На первый взгляд избыточность в популяционном кодировании выглядит несовместимой с идеей построения внутреннего представления, которое должно было бы минимизировать затраты на кодирование. К счастью, мы можем преодолеть это затруднение, воспользовавшись не таким прямым критерием затрат на

кодирование. Если активность, кодирующая какой-то объект, имеет вид гладкого холмика, по склонам которого активность стандартно спадает по мере удаления от центра, то можно полностью описать холмик активности, просто задав его центр. Поэтому более справедливой мерой затрат на кодирование была бы стоимость описания центра холмика активности плюс стоимость описания того, каким образом реальная активность элементов отличается от желаемого гладкого холмика активности.

Воспользовавшись этой мерой затрат на кодирование, мы пришли к заключению, что популяционное кодирование представляет собой удобный способ выделения иерархии все более эффективных кодирований сенсорного входа. Этот тезис лучше всего можно проиллюстрировать на простом примере. Рассмотрим нейронную сеть, которой предъявляют изображение лица. Предположим далее, что сеть уже содержит какое-то множество элементов, отведенное на представление носов, другое множество — для рта и еще одно — для глаз. Когда сети предъявляют какое-либо лицо, то в ней возникает один холмик активности у элементов носа, один — у элементов рта, и два — у элементов глаз. Расположение этих зон активности представляет собой совокупность пространственных параметров каждого свойства, кодируемого соответствующей зоной. Описать четыре зоны активности обойдется дешевле, чем описать исходное изображение, но очевидно, что еще дешевле будет описать одну зону активности на множестве элементов, опознающих лица, предполагая, конечно, что нос, рот и глаза находятся в правильных пространственных отношениях, характерных для лица.

В этой связи возникает интересный вопрос: каким образом сеть может проверить, что эти фрагменты находятся в правильных отношениях, позволяющих построить из них лицо? Не так давно появилась работа, в которой было предложено остроумное решение этой проблемы, хорошо подходящее к условиям популяционного кодирования; автор работы — Д. Боллард из Рочестерского университета.

Если нам известны положение, размеры и ориентация носа, то мы можем предсказать положение, размер и ориентацию лица, которому он принадлежит, поскольку пространственные отношения между носами и лицами примерно одинаковы. Поэтому мы устанавливаем веса в сети таким образом, чтобы зона активности в носовых элементах пы-

талась вызвать соответствующие зоны активности в лицевых элементах. Но мы также устанавливаем пороги для лицевых элементов, так чтобы одних носовых элементов было еще недостаточно для активации лицевых. Если же активность у ротовых элементов также попытается вызвать активацию в той же зоне лицевых элементов, то пороговые значения могут быть превышены. По существу, мы проконтролировали, чтобы нос и рот находились в правильных пространственных отношениях, убедившись, что они оба предсказывают одни и те же пространственные параметры для всего лица.

Этот метод проверки пространственных отношений выглядит заманчиво, поскольку использует своеобразную избыточность между различными частями изображения, которую должны хорошо выявлять методы неконтролируемого обучения. Было бы естественно поэтому попытаться применить неконтролируемое обучение для отыскания иерархических популяционных кодирований при выделении сложных форм. В 1986 г. Э. Сонд из Массачусетского технологического института продемонстрировал метод обучения простым способом популяционного кодирования для распознавания форм. Вполне вероятно, что с четким определением затрат на кодирование неконтролируемая сеть может обнаружить и более сложные иерархии, пытаясь минимизировать затраты на кодирование изображений. Р. Земел и я, работая в Торонтском университете, сейчас исследуем эту возможность.

Пользуясь неконтролируемым обучением для выделения иерархии все более экономных представлений, мы, возможно, сумеем значительно повысить скорость обучения в больших многослойных сетях. Каждый слой сети подстраивает свои входные веса, чтобы улучшить свое представление по сравнению с пред-

ставлением предыдущего слоя, так что веса, устанавливающиеся в результате обучения у одного слоя, могут не зависеть от весов у последующих слоев. Такая стратегия устраняет многие взаимодействия между весами, из-за которых обучение по методу обратного функционирования становится очень медленным в глубоких многослойных сетях.

Все процедуры обучения, о которых мы говорили до сих пор, были реализованы в нейронных сетях, у которых активность имеет только одно направление — от входа к выходу, хотя производные от ошибки могут распространяться и в обратном направлении. Можно рассмотреть другую важную возможность: сети, в которых существуют замкнутые циклы активности. Такие рекуррентные сети могут устанавливаться в стабильные состояния или демонстрировать сложную временную динамику, которой можно воспользоваться, чтобы получить последовательное поведение. Если они устанавливаются в стабильные состояния, производные от ошибок можно вычислять, применяя значительно более простые методы, чем алгоритм обратного функционирования.

Хотя исследователи разработали ряд мощных алгоритмов обучения, представляющих значительную практическую ценность, мы все еще не знаем, какими представлениями и процедурами обучения в действительности пользуется мозг. Однако рано или поздно вычислительные модели обучения в искусственных нейронных сетях будут сведены к методам, которые были открыты эволюцией. Когда это произойдет, многочисленные эмпирические данные о мозге внезапно будут по-новому осмыслены и для искусственных нейронных сетей станут возможными многие новые приложения.

Перевод К. Батаева

Наука и общество

Искаженный свет

ПРЕДСТАВЬТЕ себе, что вы рассказываете по комнате, в которой темно, хоть глаз коли, а вас просят описать молча стоящих в ней людей. С подобным затруднительным положением столкнулись астрономы, пытающиеся узнать больше о невидимом (темном) веществе — таинственной составляющей Вселенной, которая, как полагают, отвечает за 99% ее массы. Довольно странно, но они на-

чинают добиваться некоторых успехов в решении этой проблемы.

Все сведения о темном веществе выводятся из того факта, что оно имеет массу и поэтому должно создавать гравитационное поле. За последние несколько лет некоторые астрономы использовали это свойство для того, чтобы «увидеть» темное вещество. Поскольку гравитация (согласно общей теории относительности Эйнштейна) искривляет или изменяет, подобно линзе, ход лучей света, тем-

ное вещество можно увидеть, когда оно искажает какое-либо видимое изображение светящегося вещества. «Возможность этой методики едва изучена, — говорит С. Тремейн из Торонтского университета, ветеран исследования темного вещества. — Я весьма оптимистично настроен в отношении этого метода».

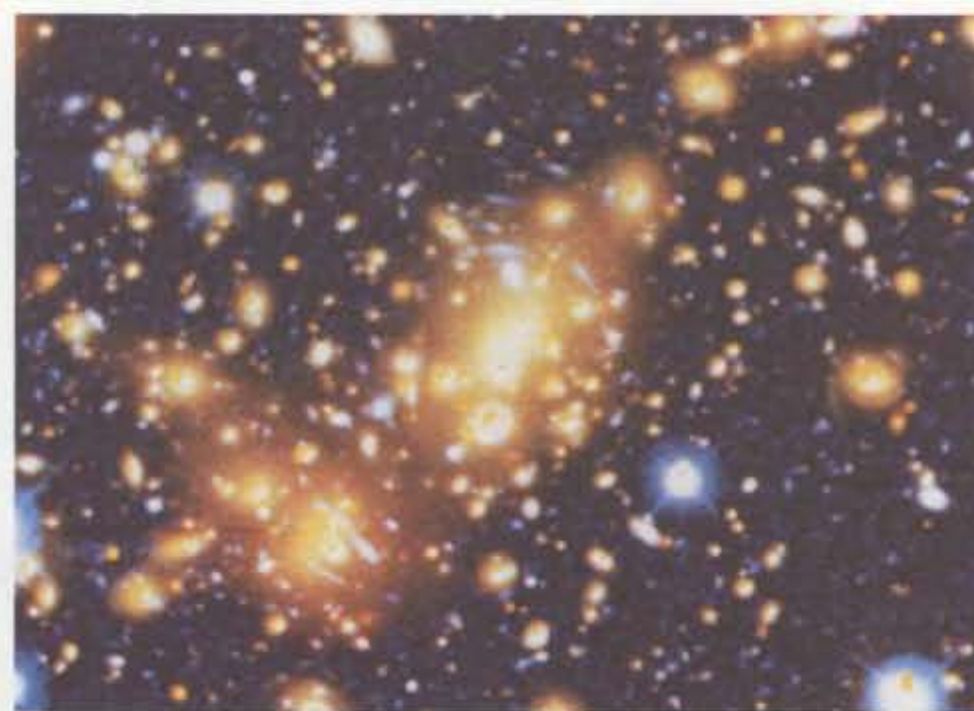
Существование темного вещества было постулировано в 70-е годы. В это время астрономы показали, что внешние области галактик вращаются значительно быстрее (примерно в 3 раза), чем предсказывалось теорией. Если бы галактики состояли только из светящегося вещества, то они должны были быстро разлететься на части. Точно так же отдельные галактики в скоплениях галактик двигались с необъяснимо высокими скоростями, а тем не менее скопления не рассыпались. Единственно правдоподобное объяснение такого поведения состоит в том, что галактики и их скопления содержат огромную долю темного вещества, которая обеспечивает гравитационный «клей», чтобы удерживать их вместе.

Большинство космологов полагают, что глыбы темного вещества способствуют объединению видимых галактик и их скоплений в группы. Распространенность темного вещества может определять, будет ли продолжаться наблюдаемое расширение Вселенной бесконечно.

Небольшое астрономическое «исследование» положило наконец начало разгадке того, где находится невидимое вещество и сколько его. Наблюдения за движениями галактик не могут дать много сведений о том, где расположено темное вещество, но их можно получить из наблюдений гравитационного искривления света. Дж. Тайсон и Р. Венк из AT&T Bell Laboratories и Ф. Вальдес из Национальной оптической астрономической обсерватории сосредоточили внимание на слабых голубых галактиках, расположенных на расстоянии нескольких миллиардов световых лет от Земли.

Каждый участок неба площадью один квадратный градус содержит свыше 300 тыс. голубых галактик — этого достаточно, чтобы обеспечить подходящий фон для поисков темного вещества. Гравитационный эффект от скоплений галактик, расположенных ближе к Земле, отклоняет излучение, идущее от более удаленных галактик, изменяя их овальную форму на удлиненные эллипсы и дуги. Форма и расположение искаженных голубых галактик указывают на распространенность и распределение вещества в ближайших скоплениях.

Тайсон обнаружил, что картина распределения темного вещества по-



СЛАБЫЕ ГОЛУБЫЕ ДУГИ (центральные области) — это удаленные галактики, излучение которых отклоняется скоплением оранжевых галактик (на переднем плане). Такое искажение выявляет наличие и количество темного вещества в этом скоплении. (Фотография: J. Anthony Tyson.)

вторяет картину распределения видимого вещества, но основная единица «скопления» имеет около 300 тыс. св. лет в поперечнике, что немного больше размера типичной галактики. В. Петросян из Станфордского университета, который провел наблюдения за гравитационными линзами, очень похожие на те, что сделал Тайсон, отмечает, что темное вещество больше, чем светящееся, концентрируется в центре скоплений. Это открытие подчеркивает, как мало известно о происхождении структуры Вселенной: в большинстве космологических моделей предсказывается, что темное вещество должно распределяться более однородно, чем видимые галактики.

Темное вещество может образовывать гало, которые простираются значительно дальше видимых границ скоплений галактик. «Тогда это легко может привести к замкнутой Вселенной», — говорит Тайсон. Другими словами, гравитационное притяжение может в конце концов остановить расширение Вселенной. Тремейн добавляет: «Нет никаких оснований для того, чтобы не было скоплений темного вещества вообще без видимого узора». В принципе большая доля массы Вселенной может находиться в невидимых темных сгустках, которые лишены светящихся галактик.

До сих пор Тайсон установил только нижний предел плотности Вселенной, равный 0,2 критической величины, необходимой для преодоления расширения. Уточнение этой оценки потребует измерения общей протяженности гало темного вещества.

Внешние области скоплений покрывают широкие участки неба, поэтому их обзор требует применения больших детекторов света, которые могут использовать все поле зрения телескопа. Существовавшие ранее детекторы были слишком малы, чтобы с их помощью можно было выполнить эту работу. Тайсон намеревался начать использование детектора большего размера осенью 1992 г.

Если темного вещества достаточно для того, чтобы, как полагают многие космологи, Вселенная стала замкнутой, то гало из темного вещества должны заполнять пространство между скоплениями галактик. В этом случае можно будет взглянуть на кажущуюся пустой часть неба и все же увидеть следы гравитационных искажений. Такие наблюдения могли бы также обнаружить скопления, состоящие только из темного вещества. И наоборот, если не появится никаких подобных искажений, то можно прийти к заключению, что плотность Вселенной значительно ниже критической величины, — вывод, который направит многих теоретиков к их классным доскам.

Тайсон провел обзор 40 «чистых» участков и заявляет, что у него уже есть ответ, но он не скажет его никому, пока дважды не перепроверит свои результаты. Дополнительное исследование с применением усовершенствованных детекторов займет около года. Пока же астрономы должны довольствоваться верой в то, что в конце туннеля из темного вещества есть свет. Кори Пауэлл

Проблема сознания

Сегодня приблизиться к ее решению позволяют исследования зрительной системы. Этот подход требует тесного сотрудничества психологов и нейробиологов

ФРЕНСИС КРИК, КРИСТОФ КОХ

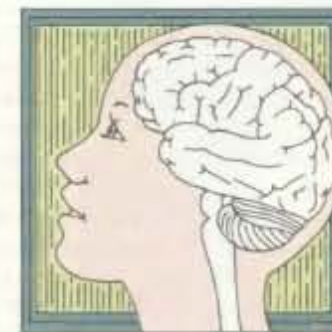
ОДИН из главных вопросов современной нейробиологии — вопрос о связи между психикой и мозгом. Каждый согласится с тем, что то, что мы называем психикой, тесно связано с определенными аспектами деятельности мозга, а не сердца, как считал Аристотель. Самый загадочный аспект этой деятельности — сознание, которое может принимать самые разнообразные формы — от ощущения боли до самосознания.

В прошлом психику (или душу) часто рассматривали (например, Декарт) как нечто нематериальное, не зависящее от мозга, но каким-то образом с ним взаимодействующее. И по сей день некоторые нейробиологи, среди них Дж. Экклз, убеждены в том, что душа не связана с телом. Большинство же считают, что все аспекты психики, включая и самое удивительное ее свойство — сознание, вероятно, можно объяснить материалистически как результат активности больших популяций взаимодействующих нейронов. Как заметил сто лет назад отец американской психологии Уильям Джеймс, сознание — не состояние, а процесс.

Каков в точности этот процесс, предстоит еще выяснить. После появления книги Джеймса «Принципы психологии» концепция сознания в течение многих лет подвергалась табу в американской психологии из-за господства в ней бихевиоризма. С возникновением в середине 50-х годов когнитивной психологии ученые вновь получили возможность анализировать психические процессы в противовес методу, основанному лишь на наблюдении поведения. Но, несмотря на эти сдвиги, большинство когнитивных психологов, как и почти все нейробиологи вплоть до самого последнего времени, игнорировали проблему сознания. Она воспринималась либо как чисто «философская», либо как слишком «скользкая» для экспериментального изучения. Нейробиологу, решившему изучать эту проблему, было непросто получить необходимые средства.

Такая ситуация казалась нам нелепой, поэтому несколько лет назад мы начали задумываться над тем, как лучше подойти к проблеме сознания с научных позиций. Как объяснить, что психические процессы обусловлены импульсной активностью больших популяций нейронов? Хотя некоторые исследователи убеждены в безнадежности такого подхода, мы считаем, что проявлять излишнюю шепе-

ЗРИТЕЛЬНОЕ СОЗНАНИЕ означает нечто большее, чем простое видение находящихся перед глазами предметов. Мозг каким-то образом сохраняет трехмерное представление о находящемся в поле зрения объекте. Если вы смотрите на чей-нибудь затылок, мозг заключает, что с другой стороны головы должно быть лицо. Мы очень бы удивились, если бы вдруг с помощью зеркала обнаружили, — как на этой картине Рене Магритта, — что лицо выглядит в точности, как затылок.



тельность по поводу тех аспектов проблемы, которые не поддаются научному разрешению, а точнее говоря, не поддаются разрешению только с помощью существующих научных представлений, — значит, занять не слишком продуктивную позицию. Действительно, могут потребоваться радикально новые концепции — вспомним хотя бы сдвиги в научном мышлении, вызванные квантовой механикой. Поэтому единственный разумный подход к проблеме — форсировать ее эксперименталь-

ную разработку до тех пор, пока не возникнут дилеммы, требующие нового осмысления.

К проблеме сознания существует много подходов. По мнению некоторых психологов, любая удовлетворительная теория должна пытаться объяснить как можно больше различных аспектов сознания: эмоции, воображение, фантазии, мистический опыт и т. д. Хотя в будущем такая всеобъемлющая теория, безусловно, потребует, мы решили, что разумнее будет начать с какого-либо частного и более «податливого» аспекта сознания. Какой выбрать аспект, должен решать сам исследователь. Наш выбор пал на зрительную систему млекопитающих потому, что человек — животное, обладающее весьма хорошим зрением, и потому, что зрительной системе посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см. статью С. Зеки «Зрительный образ в сознании и в мозге» на с. 33).

Нелегко дать точную формулировку предмету нашего исследования: прежде чем «зрительное сознание» можно будет описывать научно, потребуются многочисленные и обстоятельные эксперименты. Не пытались мы определять и «сознание» вообще, поскольку избегаем скороспелых определений. (Если это покажется отговоркой, попробуйте сами дать определение слову «ген», и вы поймете, что это не так просто.) И все же полученные экспериментальные данные проливают некоторый свет на природу зрительного сознания, позволяя определить направления дальнейших исследований. В этой статье мы попытаемся показать, каким образом такие данные могут служить путеводной нитью к изучению столь сложной и интригующей проблемы.

Специалисты в области физиологии зрения единодушно указывают на плохую постановку проблемы зрительного сознания. В математике «плохая постановка задачи» означает, что для ее решения необходимо ввести дополнительные условия. Хотя главная функция зрительной системы заключается в восприятии объектов и событий окружающего мира, доступная для глаза информация сама по себе еще не обеспечивает ту неповторимую интерпретацию образного мира, которую выполняет мозг. Чтобы интерпретировать воспринимаемую глазом информацию, мозг должен использовать прошлый опыт (собственный опыт человека или опыт его далеких предков, запечатленный в генах). В качестве примера можно привести трехмерное восприятие окружающего мира в результате переработки

двумерных сигналов, воздействующих на сетчатку двух или даже только одного глаза.

Согласятся физиологи-теоретики и с тем, что зрительное восприятие — конструктивный процесс, при котором мозг должен выполнять сложные формы деятельности (иногда называемые «вычислениями»), решая, какой именно интерпретации неопределенного зрительного входа ему следует придерживаться. Под «вычислением» подразумевается деятельность мозга, направленная на формирование символического представления о зримом мире в совокупности с картированием (в математическом смысле) некоторых аспектов этого мира в мозговых структурах.

Р. Джеккендофф из Университета Брандейса, как и большинство когнитивных психологов, предполагает, что производимые мозгом вычисления носят во многом бессознательный характер, и то, что мы осознаем, всего лишь результат этих вычислений. Но Джеккендофф не согласен с распространенным мнением, что осознание это происходит на высших уровнях вычислительной системы, и выдвигает теорию о промежуточном уровне сознания.

По мнению Джеккендоффа, то, что мы видим, связано с нашим представлением о плоскостях, которые мы воспринимаем непосредственно, вместе с их очертаниями, ориентацией, цветом, текстурой и движением. (Такой подход имеет много общего с тем, что ныне покойный Д. Марр из Массачусетского технологического института называл «2½-мерным изображением»). Это изображение «больше» чем двумерное, поскольку отражает ориентацию видимых плоскостей. Но оно «меньше», чем трехмерное, потому что информация о глубине в явном виде в нем не представлена.) На более высоком уровне это изображение перерабатывается мозгом в трехмерное. Джеккендофф убежден, что у нас нет зрительного осознания такого трехмерного представления.

Сказанное можно пояснить следующим примером. Глядя на человека, повернувшегося к вам спиной, вы видите его затылок, а не лицо. Но мозг без вашего ведома делает заключение, что лицо у человека есть. И вы вправе утверждать это, так как, если бы человек вдруг обернулся и у него не оказалось бы лица, вы, вероятно, сильно бы удивились.

Представление, на котором сосредоточился наблюдатель и которое соответствует видимому им затылку, — это то, что он ясно осознает. Заключение, которое его мозг сделал о

лице, основывается, по-видимому, на своего рода трехмерном представлении. Это вовсе не означает, что поток информации направлен только от плоского представления к трехмерному; скорее всего этот поток существует в обоих направлениях. Когда вы воображаете себе лицо человека, в вашем сознании в первую очередь возникает плоское представление, порожаемое информацией из трехмерной модели.

ВАЖНО различать представление в явном и неявном виде. Явное представление — это то, что символизируется, не подвергаясь дальнейшей переработке. Неявное представление содержит точно такую же информацию, но, чтобы она стала явной, оно требует дополнительной переработки. Так, паттерн цветных точек на телевизионном экране содержит представление об объекте (например, человеческом лице) в неявном виде, а в явном виде представлены лишь сами точки и их местоположение на экране. Когда вы видите на экране человеческое лицо, в вашем мозге происходит разряд нейронов, которые своей активностью в некотором смысле и символизируют это лицо.

Мы называем этот паттерн разряжающихся нейронов активным представлением. В мозге должно храниться и латентное представление о лице — возможно, в виде особого паттерна синаптических связей между нейронами (см. статью Дж. Хинтона «Как обучаются нейронные сети» на с. 113). Так, в вашем мозге, возможно, хранится представление о Статуе Свободы, которое большую часть времени пребывает в неактивном состоянии. Если вы подумаете о Статуе, представление становится активным, что сопровождается импульсной активностью соответствующих нейронов.

Один и тот же объект может быть представлен в мозге по-разному — как зрительный образ, набор слов и соответствующих звуков или даже как прикосновение или запах. Судя по всему, эти разные представления об одном и том же объекте взаимодействуют между собой. Представление, по-видимому, охватывает множество нейронов, как относящихся к какой-либо одной мозговой структуре (о чем говорится в статье Дж. Хинтона), так и к разным областям мозга. Но представление далеко не всегда имеет столь простую и четкую организацию, как может показаться неискушенному исследователю. В результате изучения импульсной активности нейронов в разных отделах мозга обезьяны и из наблюдений за по-

следствиями некоторых мозговых травм у человека получены данные, убедительно свидетельствующие о том, что даже разные характеристики лица — и связанный с ними смысл — могут быть представлены в разных отделах мозга.

Во-первых, есть общее представление о лице как таковом: два глаза, нос, рот и т. д. Нейроны, участвующие в организации такого представления, обычно не очень «озабочены» точными размерами лица и его положением в поле зрения и не особенно чувствительны к небольшим изменениям его ориентации в пространстве. У обезьян одни нейроны сильнее всего реагируют на поворот лица в определенном направлении, а другие — на направление, в котором устремлен взор.

Во-вторых, имеются представления о частях лица, не совпадающие с представлением о лице вообще. Кроме того, даже такие признаки, как пол обладателя лица, выражение лица, принадлежность лица знакомому или незнакомому человеку и в особенности личность обладателя лица, могут коррелировать с нейронной активностью в совершенно разных отделах мозга.

Далеко не прост и вопрос о том, что мы осознаем в данный момент времени тем или иным чувством. Мы предположили, что может существовать очень нестойкая форма «мимолетного» сознания, в которой представлены лишь относительно простые признаки объекта и которая не требует подключения внимания. Мозг строит из этого «мимолетного» сознания представление, на котором сосредоточивается наблюдатель, — то есть то, что он ясно и живо видит и что уже требует работы внимания. А это, вероятно, лежит в основе образования трехмерных представлений об объекте, а затем — и представлений более высокого когнитивного порядка.

Представления, соответствующие ясному сознанию, по-видимому, отличаются рядом особенностей. Уильям Джеймс считал, что сознание требует как внимания, так и кратковременной памяти. Эту точку зрения разделяет и большинство современных психологов. Как пишет Джеккендофф, внимание «обогашает» сознание, подразумевая под этим, что если для деятельности некоторых ограниченных форм сознания внимание может и не иметь сколь-либо существенного значения, то для «полного» сознания оно необходимо.

Еще не вполне ясно, какие формы памяти участвуют в сознании. Нужна ли для сознания долговременная па-

мять? Некоторые формы приобретенного знания переплетаются с механизмами переработки информации настолько тесно, что почти наверняка используются при осознании. С другой стороны, как показывают наблюдения за больными с поврежденным мозгом (например, случай больного Г. М., описанный в статье «Биологические основы обучения и индивидуальности» Э. Кэндела и Р. Хокинса), способность к долговременному запоминанию нового материала для сознания не существенна.

Трудно, однако, вообразить себе человека, у которого напрочь бы отсутствовала память — пусть даже самая короткая — на только что происшедшие события. Психологи, специализирующиеся в области зрительного восприятия, говорят о портретной памяти, длящейся доли секунды, и оперативной памяти, требующейся, например, для запоминания номера телефона, продолжительность которой (если отсутствует повторная ее активация) составляет несколько секунд. Неясно, играют ли обе эти формы памяти сколь-либо заметную роль в сознании. Так или иначе, не исключено, что разделение кратковременной памяти на две описанные формы (портретную и оперативную) носит слишком грубый характер.

Если все эти сложные процессы зрительного сознания протекают в структурах мозга, то где именно локализован каждый из них? Участвовать в сознании могут многочисленные области мозга, но доминирующую роль здесь, безусловно, играет новая кора (неокортекс). Зрительная информация из сетчатки поступает в новую кору главным образом через структуру таламуса, называемую наружным коллатеральным телом; другой важный зрительный путь из сетчатки проходит через верхние бугры четверохолмия, расположенные в самой верхней части ствола мозга.

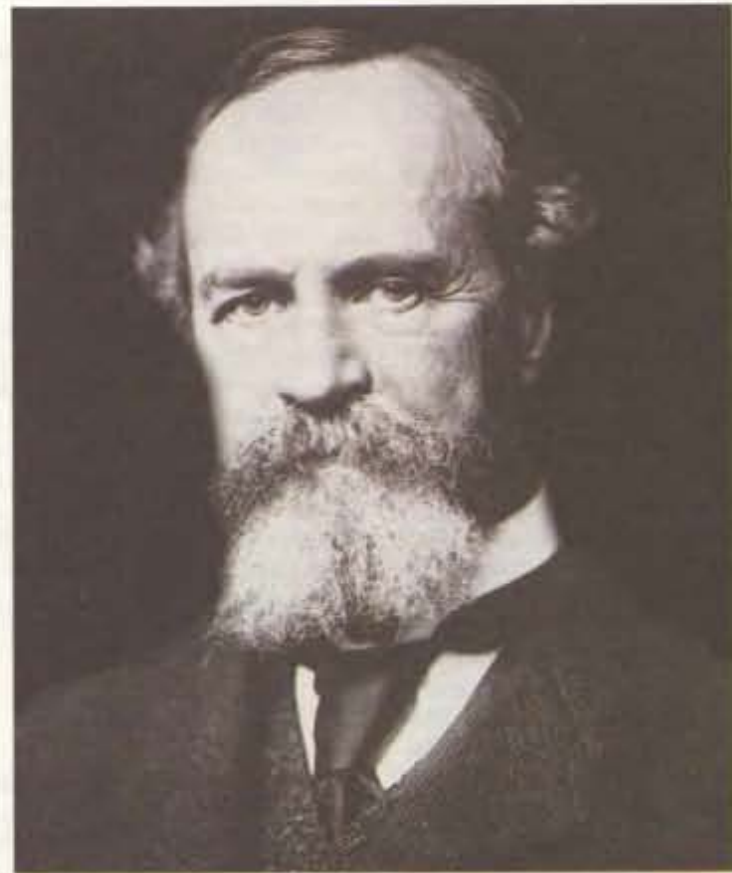
У человека кора представляет собой два пласта нервной ткани с замысловатым рельефом, покрывающих каждое мозговое полушарие. Эти пласты соединены друг с другом толстым пучком из примерно полумиллиарда аксонов, называемым мозолистым телом. Хорошо известно, что, если мозолистое тело перерезать (как это делается при некоторых неизлечимых формах эпилепсии), одна сторона мозга не будет сознавать, что видит другая.

Так, левая сторона мозга (у правой), судя по всему, после перерезки мозолистого тела вообще не осознает зрительную информацию, воспринимаемую правым полушарием. А это говорит о том, что информация, не-

обходимая для зрительного сознания, никоим образом не может достигнуть другой стороны мозга, направляясь вниз в мозговой ствол, а оттуда обратно вверх. У здорового человека зрительная информация из одного полушария может проникнуть в другое только через аксоны мозолистого тела.

Другой отдел мозга — система гиппокампа — участвует в «фотографи-

Грубо говоря, новая кора выполняет у бодрствующих животных, по-видимому, две функции. Используя приблизительную и обладающую некоторой избыточностью монтажную схему, детерминированную генами и процессами эмбрионального развития (см. статью К. Шатц «Развивающийся мозг» на с. 23), она прибегает к зрительному и другим формам опыта для того, чтобы осуществить медлен-



УИЛЬЯМ ДЖЕЙМС — отец американской психологии, заметивший, что сознание — не состояние, а процесс.

ческом» запоминании разовых эпизодов, информацию о которых спустя недели и месяцы она может передавать новой коре (об этом см. в статье Кэндела и Хокинса). Эта система расположена в мозге так, что способна получать сигналы из многочисленных отделов мозга и посылать сигналы во многие структуры.

Таким образом, может сложиться впечатление, что важным центром сознания является система гиппокампа. Это, однако, не так: изучение больных с повреждениями мозга показывает, что эта система не играет сколь-либо существенной роли в зрительном сознании, хотя, разумеется, без нее человек (как, например, Г. М.) испытывает огромные трудности в повседневной жизни, так как не в состоянии вспомнить события, случившиеся минутой раньше.

Второй функцией новой коры (во всяком случае, ее зрительной части) — чрезвычайно быстрое реагирование на поступающие сигналы. Для этого она пользуется вновь образованными категориями и стремится найти такие сочетания активных нейронов, прошлый опыт которых позволяет наиболее точно представить в мозге соответствующие объекты и события зримого мира в данный момент времени. На образование таких коалиций активных нейронов могут влиять так-

же сигналы из других отделов мозга (например, сигналы коре о том, чему следует уделять наибольшее внимание, или информация о наиболее вероятной природе раздражителя).

Как указывал Джеймс, сознание непрерывно меняется. Быстро образующиеся коалиции нейронов встречаются на разных уровнях мозга и взаимодействуют между собой, образуя еще более крупные коалиции. Они нестойки и функционируют обычно лишь доли секунды. Поскольку в зрительной системе подобные коалиции составляют основу того, что мы видим, эволюция позаботилась о том, чтобы их образование шло как можно быстрее; в противном случае ни одно животное не могло бы выжить. Мозг вынужден образовывать нейронные коалиции быстро, так как по компьютерным стандартам нейрон работает очень медленно. Эту относительную медленность нейронов мозг компенсирует частью одновременной и параллельной работой большого числа нейронов, частью — грубой иерархической организацией системы.

Если зрительное сознание в любой момент времени соответствует популяциям импульсирующих нейронов, закономерно встает вопрос: где именно в мозге находятся эти нейроны и как они работают? Вряд ли все нейроны новой коры, активность которых в данный момент времени превосходит фоновую, непременно участвуют в процессах сознания. Теоретически следовало бы ожидать, что хотя бы часть таких нейронов занята вычислениями (то есть они стремятся «войти» в оптимальные коалиции), а другие выражают результаты этих вычислений, иными словами, выражают то, что мы видим.

ЭТО ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ подтверждают и некоторые экспериментальные данные. Идентифицировать нейроны, чья активность символизирует сознание, помогает так называемый феномен бинокулярного соперничества. Впечатляет демонстрация этого феномена с помощью аппарата, изобретенного С. Дюенсинг и Б. Миллером и выставленного в Музее науки в Сан-Франциско.

Бинокулярное соперничество отмечается в том случае, когда глаза человека имеют разные входы по отношению к одной и той же части поля зрения. Зрительная система левой стороны мозга получает сигналы от обоих глаз, но видит только часть зрительного поля справа от точки фиксации взора. Аналогично можно сказать и о зрительной системе правой половины мозга. Если эти два конфликтующих входа начинают «соперничать», чело-

век видит не результат наложения друг на друга двух входов, а то один из них, то другой.

Вышеупомянутый экспонат, получивший название «чеширский кот», устроен следующим образом: зритель помещает голову в определенное положение и фиксирует взгляд. Благодаря определенным образом расположенному зеркалу (см. рис. на с. 116—117) одним своим глазом он может смотреть на возникающее прямо перед ним отражение лица другого человека, а другим видеть сбоку чистый белый экран. Если наблюдатель проводит рукой перед этим чистым экраном в той же самой части зрительного поля, которую занимает лицо, последнее внезапно исчезает. Внимание мозга поглотило движение руки. Без внимания же видеть лицо нельзя. Если наблюдатель сместит взор, лицо появится снова.

Иногда исчезает только часть лица. Например, остается только один или оба глаза. Если внимание наблюдателя сосредоточено на улыбке, большая часть лица может исчезнуть, а улыбка останется. Этот эффект напоминает улыбку Чеширского Кота, описанную Льюисом Кэрроллом в «Приключениях Алисы в Стране чудес», а потому получил название «чеширский кот».

Эксперимент «чеширский кот»

ЭТОТ простой опыт с зеркалом иллюстрирует один из аспектов зрительного сознания. В его основе лежит так называемый феномен зрительного соперничества, возникающий в том случае, когда глаза имеют разные входы, соответствующие одной и той же части поля зрения. Движение в поле зрения одного глаза может вызвать исчезновение либо всего изображения, либо только отдельных его частей. Движение привлекает к себе все внимание мозга.



на этот вопрос можно следующим образом (фактическая же картина гораздо сложнее): активность одних нейронов коррелирует с изменениями перцепта, а у других средняя частота импульсации почти не изменяется и не зависит от того направления, в котором в глазах животного происходит смещение объекта в данный момент времени. Таким образом, маловероятно, что зрительному сознанию животного в данный момент времени соответствует активность всех нейронов зрительной коры. Какие именно нейроны участвуют в этом процессе — предмет дальнейших исследований.

Мы предположили, что когда человек что-нибудь отчетливо видит, за тем, что он видит, стоят активно импульсирующие нейроны. Можно назвать это принципом нейронной активности. Есть экспериментальные свидетельства, подтверждающие и это предположение. Во-первых, это описанная Зеки импульсация нейронов в зоне V2 в ответ на кажущиеся контуры. Второй и, вероятно, более впечатляющий пример — заполнение слепого пятна. Слепое пятно в каждом глазу связано с отсутствием фоторецепторов в той области сетчатки, где из нее выходит зрительный нерв, идущий в мозг. Оно отстоит

приблизительно на 15° от центральной ямки сетчатки (зрительного центра глаза). Тем не менее, замурив один глаз, никакого отверствия в поле зрения вы не увидите.

Философ Д. Деннетт из Университета Тафтса выделяется среди прочих философов тем, что он интересуется как психологией, так и проблемами мозга. Такой интерес можно только приветствовать. В одной из последних своих книг, «Постигнутое сознание», он утверждает, что говорить о феномене «заполнения» неправомерно. И делает правильное замечание, что «отсутствие информации не означает еще информацию об отсутствии». Опираясь на это общее положение, он предполагает, что мозг не заполняет слепое пятно, но скорее попросту его игнорирует.

Сам по себе этот аргумент Деннетта, однако, еще не доказывает невозможность заполнения; он всего лишь допускает, что такого феномена может и не быть. Деннетт утверждает также, что «в мозге нет механизма, который обеспечивал бы заполнение слепого пятна в этом месте сетчатки». А это утверждение просто неверно. Первичная зрительная кора (зона V1) не имеет прямого входа от одного глаза, но располагает полноценным «механизмом» переработки

сенсорного входа из другого глаза. Р. Гаттас и его сотрудники из Федерального университета в Рио-де-Жанейро показали, что у макака некоторые нейроны зоны V1 в области проекции слепого пятна реагируют на сенсорный вход из обоих глаз, в чем, возможно, принимают участие входы из других участков коры. Более того, в случае простого заполнения слепого пятна некоторые нейроны этой области ведут себя так, словно они активно участвуют в этом процессе.

Таким образом, заявление Деннетта о феномене заполнения слепого пятна попросту неверно. Кроме того, как показали психологические опыты В. Рамачандрана (см. статью: В. Рамачандран. Слепые пятна, «В мире науки», 1992, № 7), заполнение слепого пятна может носить очень сложный характер, зависящий от общего контекста зрительной сцены. Автор спрашивает: как мозг может игнорировать нечто, что фактически управляет вниманием?

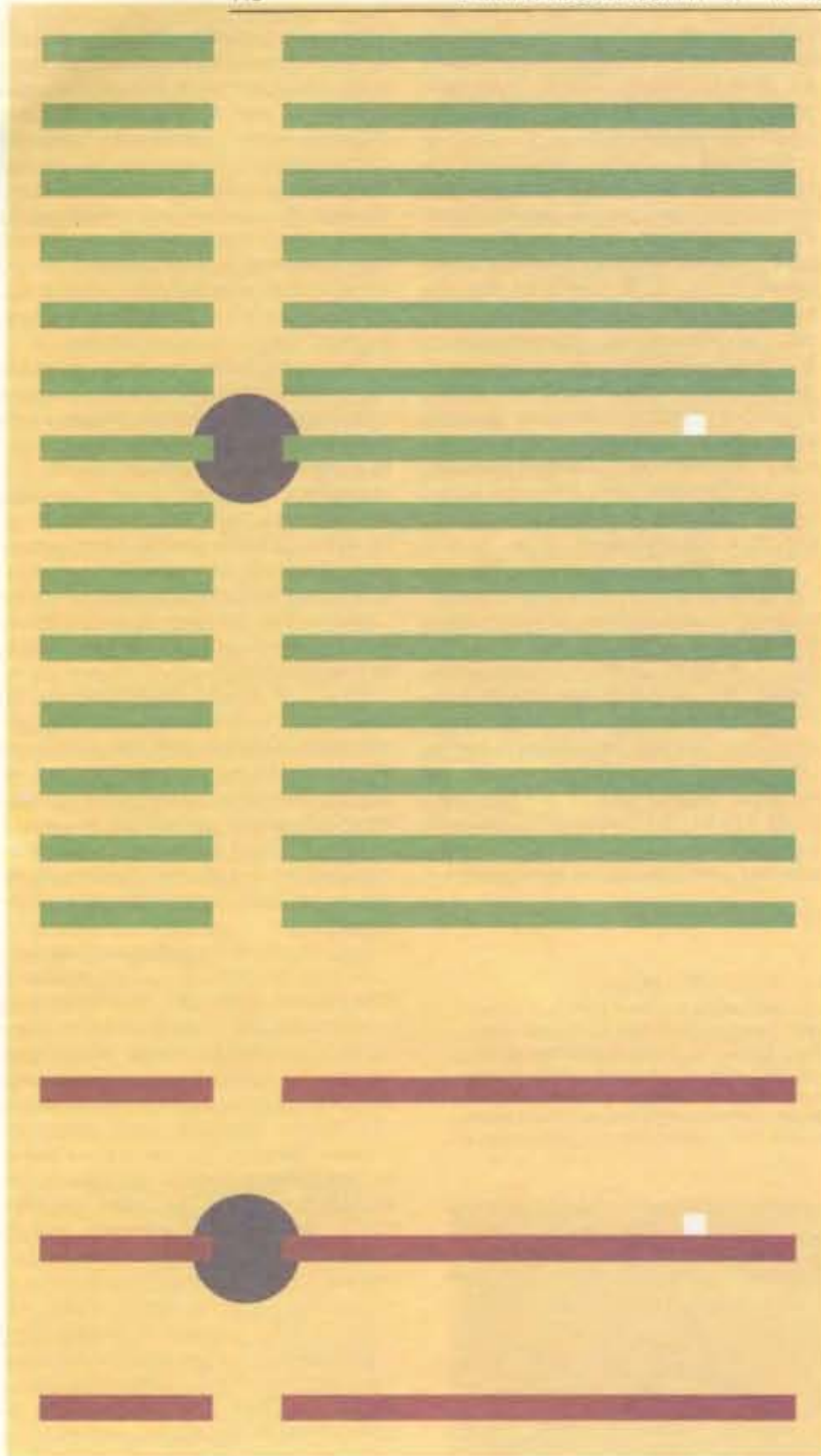
Итак, не нужно отмахиваться от феномена заполнения, как от чего-то несуществующего или слишком необычного. Не исключено, что это — основной интерполирующий процесс, который может протекать на самых разных уровнях новой коры. Кстати, заполнение — хороший пример того, что называют конструктивным процессом.

Как обнаружить нейроны, чья импульсная активность символизирует конкретный перцепт? У. Ньюсам и сотрудники из Станфордского университета провели серию блестящих опытов на нейронах корковой области МТ макака. Изучая активность отдельного нейрона этой области, можно обнаружить, что лучше всего он реагирует на очень специфические зрительные характеристики, связанные с движением. Например, такой нейрон способен интенсивно разряжаться в ответ на движение полосы в определенной части поля зрения, но только в том случае, если полоса ориентирована под определенным углом и движется в одном из двух направлений перпендикулярно своей длине в определенном интервале скорости.

Добиться возбуждения только одного нейрона технически очень трудно; известно, однако, что нейроны, реагирующие примерно на одно и то же положение, ориентацию и направление движения полосы, как правило, располагаются в коре рядом. Экспериментаторы обучили обезьяну выполнять простое задание по различным характеристикам движения во множестве пятен, одни из которых двигались хаотически, а остальные — в определенном направлении. Было

Поле зрения наблюдателя разделяется помещаемым между его глаз зеркалом на две половины (а). Один глаз видит кота; другой глаз — отражение в зеркале белой стены или какого-либо другого фона. Затем наблюдатель проводит с «чистой» стороны зеркала рукой через ту область зрительного поля, в которой в другом глазу находится изображение кота (б). В результате изображение кота может полностью исчезнуть. Если же наблюдатель до взмаха руки особенно внимательно рассматривал какие-нибудь определенные части изображения — например, глаза или рот кота, они могут остаться в поле зрения.





ОБМАН ЗРЕНИЯ, описанный В. Рамачандраном, иллюстрирует способность мозга восполнять или компенсировать зрительную информацию, недостающую из-за того, что изображение объекта приходится на слепое пятно глаза. Когда вы смотрите на рисунок из прерывистых зеленых полос, в зрительной системе возникает изображение двух иллюзорных контуров, определяющих вертикальную полосу. Теперь закройте правый глаз и сфокусируйте взгляд на белом квадрате в верхней серии полос. Приближайте страницу к глазу до тех пор, пока не исчезнет синий кружок (примерно в 15 см от носа). По словам большинства испытуемых, они видят вертикальную полосу в области слепого пятна сплошной, а не прерывистой. Проведите то же самое с серией из трех красных полос. Иллюзорные вертикальные контуры очерчены менее четко, и зрительная система стремится заполнить слепое пятно горизонтальной полосой. Таким образом, мозг восполняет недостающую зрительную информацию по-разному.

установлено, что электрическая стимуляция небольшого участка определенной локализации в корковой области МТ вызывает почти всегда ожидаемые нарушения в различении параметров движения.

Таким образом, стимуляция этих нейронов может влиять на поведение и, возможно, зрительное восприятие животного. Описанные опыты, однако, не убеждают в том, что активность таких нейронов является точным нервным коррелятом восприятия. Коррелятом могла бы быть только популяция из активируемых нейронов. А возможно, истинный коррелят восприятия — импульсация нейронов другого уровня зрительной иерархии, на которую сильно влияют нейроны, активируемые в МТ.

Сказанное относится и к феномену бинокулярного соперничества. Ясно, что проблему поиска нейронов, чья активность символизирует конкретный перцепт, решить будет непросто. Чтобы идентифицировать такие нейроны даже для какого-нибудь одного типа перцепта, потребуется множество кропотливых экспериментов.

ПОХОЖЕ, что цель живого зрительного сознания — «подпитка» тех корковых областей, которые «работают» над смыслом того, что человек видит; отсюда информация направляется, с одной стороны, в систему гиппокампа, где подвергается кодированию (временному) в долгосрочную эпизодическую память, а с другой — в отделы моторной (двигательной) системы, ответственные за планирование движений. Но возможен ли переход от зрительного восприятия к поведенческому ответу без какого-либо зрительного осознания?

То, что такой переход возможен, наглядно демонстрирует довольно многочисленная категория больных со «слепым зрением». Эти люди, которые все получили травму в области зрительной коры, могут достаточно точно определять положение зрительных целей или следить взглядом за их движением, но напрочь отрицают при этом, что они вообще что-либо видят. Они удивляются своим зрительным способностям так же сильно, как и их лечащие врачи. Объем «пропускаемой» информации, однако, у таких больных ограничен: они обладают некоторой способностью реагировать на длину световой волны, ориентацию и движение объектов, но не могут отличить треугольник от квадрата.

Разумеется, было бы очень интересно узнать, какие у этих больных задействованы нервные пути. Вначале исследователи предположили, что пути эти проходят через верхние бугры

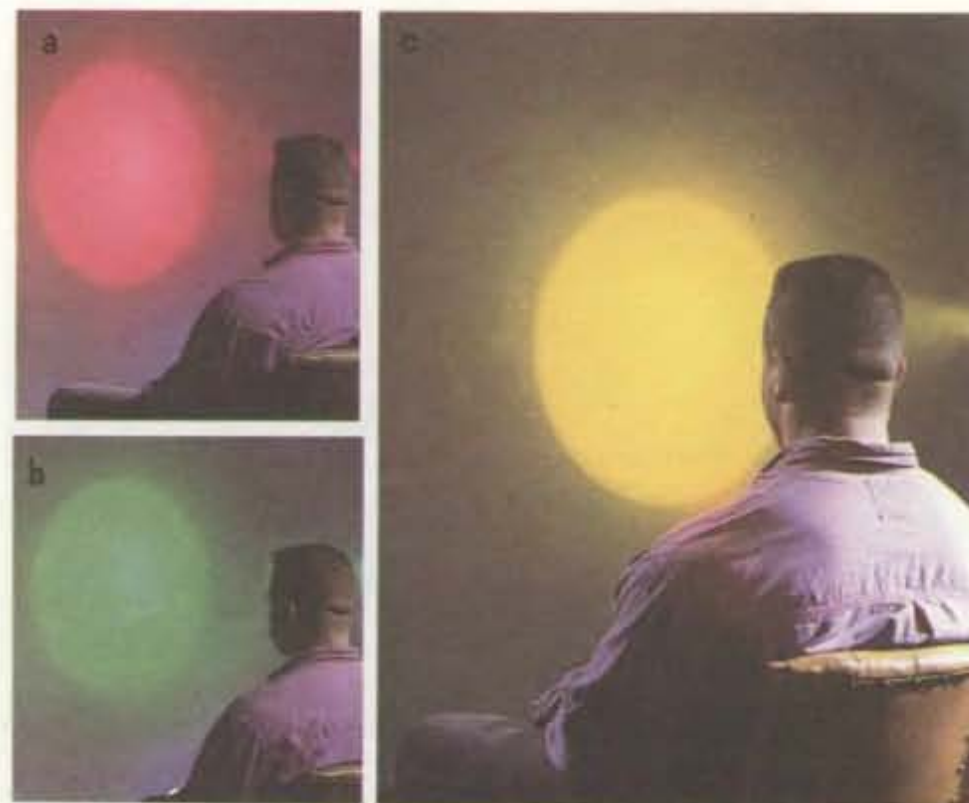
четверохолмия. Проведенные недавно опыты указывают на участие прямых, хотя и слабо выраженных связей между наружным колленчатым ядром и некоторыми областями коры (например, зоной V4). Неясно, существенна ли для зрительного сознания интактная зона V1. Предполагают, что зрительные сигналы у людей со «слепым зрением» слишком слабы для того, чтобы активность нейронов могла породить сознание, но обладают достаточной силой для проникновения в моторную систему мозга.

Люди с нормальным зрением то и дело реагируют на зрительные сигналы, которые полностью до их сознания не доходят. Сложные, но стереотипные действия, почти или вообще не сопровождающиеся зрительным сознанием, свойственны любой автоматической деятельности (например, вождению автомобиля). В других случаях передаваемая информация либо очень ограничена, либо сильно ослаблена. Поэтому, хотя мы и в состоянии функционировать без зрительного сознания, наше поведение в этом случае довольно бедно.

Ясно, что для осознания перцепта требуется определенное время. Трудно определить, сколько именно времени занимает эпизод зрительного осознания, но один из аспектов этой проблемы можно продемонстрировать экспериментально: если сигналы следуют друг за другом с небольшим разрывом во времени, мозг перерабатывает их как одновременные.

Перед испытуемым на 20 мс вспыхивает круг красного цвета, который сразу же сменяется 20-миллисекундной вспышкой зеленого цвета на том же самом месте. По словам испытуемого, он не видел, что красная вспышка сменялась зеленой. Он видел лишь желтую вспышку, которую и должен был бы заметить, если бы красный и зеленые круги вспыхивали одновременно. Испытуемый не смог бы ощутить желтого цвета, если бы информация от зеленой вспышки не перерабатывалась и не интегрировалась мозгом с информацией о предшествовавшей красной.

Подобные эксперименты привели психолога Р. Эфрона, работающего в настоящее время в Калифорнийском университете в Дейвисе, к заключению, что время переработки информации при зрительном восприятии составляет около 60-70 мс. Экспериментально показано, что примерно такое же время требуется и для осознания звуков, воспринимаемых слуховой системой. Не исключено, однако, что на более высоких уровнях зрительной иерархии и в других структурах мозга периоды переработки информации могут быть иными. А кро-



КОРОТКИЕ ВСПЫШКИ разного цвета позволяют экспериментально определить минимальное время, требующееся для зрительного осознания. На экране на 20 мс вспыхивает красный круг (а), сразу же сменяющийся вспышкой зеленого цвета длительностью 20 мс (b). Испытуемый же сообщает, что видел только одну вспышку желтого цвета (с) — цвета, который он ощутил бы, если бы красный и зеленый круги вспыхивали одновременно. Испытуемый не осознает, что красный цвет сменяется зеленым до тех пор, пока продолжительность вспышки не достигнет 60—70 мс.

ме того, у тренированных испытуемых переработка информации идет быстрее, чем у новичков.

Поскольку в некоторых формах зрительного сознания участвует внимание, было бы полезно изучить и его механизмы. Движения глаз можно рассматривать как одну из форм проявления внимания, ибо участок поля зрения, которому отвечает высокая разрешающая способность, очень мал — с ноготь большого пальца на расстоянии вытянутой руки. Поэтому мы и двигаем глазами, стремясь взглянуть на предмет прямо и разглядеть его более отчетливо. Глаза обычно совершают 3—4 движения в секунду. Психологи, однако, показали, что существует, по-видимому, и более быстрая форма внимания, действующая и в то время, когда глаза неподвижны.

Вопрос о психологической природе этого более быстрого механизма внимания вызывает в настоящее время большие споры. Как, однако, показали нейрофизиологи (в том числе Р. Десафмон и его сотрудники из Национального института психического здоровья), частота разрядов некоторых нейронов в зрительной системе у макака зависит от того, к какому предмету в поле зрения животное

проявляет внимание. Таким образом, внимание — не только психологическая категория; у него есть и доступные для наблюдения нервные корреляты. Рядом ученых было обнаружено, что в процессах зрительного внимания участвует подушка (одно из ядер таламуса). На наш взгляд, таламус вообще заслуживает того, чтобы называться «органом внимания»; впрочем, сначала следует доказать правомерность такого названия.

ГЛАВНАЯ проблема заключается в том, чтобы определить, какая форма активности в мозге непосредственно соответствует зрительному сознанию. Предполагалось, что каждая корковая область порождает осознание зрительных признаков только в том случае, если нейроны, отвечающие за восприятие, располагаются друг над другом в виде колонки, перпендикулярной поверхности коры. Так, зона V1 могла бы кодировать ориентацию объекта, а область МТ — его движение. Зеки, однако, указывает на то, что до сих пор экспериментаторам не удалось обнаружить такой области мозга, где сходилась бы вся информация, требующаяся для зрительного сознания. Деннетт окрестил это гипотетическое место

«картезианским театром». Он теоретически обосновывает невозможность его существования.

По-видимому, сознание «рассеяно» не по какой-нибудь ограниченной мозговой структуре (подобной, например, описанным Хинтоном нервным сетям), но охватывает более обширные области новой коры. Вряд ли ясное зрительное сознание связано с деятельностью всех областей коры, ибо некоторые из них попросту не реагируют на зрительные сигналы. Сознание, например, может быть связано только с теми областями, которые образуют прямые обратные связи с зоной VI, или же с теми из них, которые посылают взаимные проекции в 4-й слой. (В последнем случае такие области всегда будут находиться на одном и том же уровне зрительной иерархии.)

Таким образом, ключевой вопрос можно сформулировать и следующим образом: как из зрительных сигналов мозг образует представления? Если решающую роль в зрительном сознании и в самом деле играет внимание, то мозг мог бы образовывать представления, попросту направляя внимание в данный момент времени только на один объект и быстро переключая его с одного предмета на другой. Так, нейроны, кодирующие разные признаки предмета внимания, могли бы короткое время разряжаться вместе (возможно, быстрыми вспышками импульсов).

Такая быстрая одновременная активность могла бы не только возбуждать нейроны, символизирующие связанный с объектом «смысл», но и вызывать временное усиление соответствующих синапсов, так что возможно было бы быстрое вспоминание именно этого паттерна импульсации (своеобразная форма кратковременной памяти). (Если в кратковременной памяти требуется удержать только одно представление — как, например, при запоминании какого-либо задания — участвующие в процессе нейроны могут разряжаться в течение более продолжительного отрезка времени (см. статью П. Гольдман-Ракич «Оперативная память и разум» на с. 63).

Трудности начинаются тогда, когда требуется одновременное осознание более чем одного объекта. Если бы в активности быстро разряжающихся нейронов были представлены все признаки двух или более объектов, произошла бы путаница. Цвет одного объекта мог бы быть «привязан» к форме другого. Такое иногда случается при очень коротких предъявлениях объектов.

Некоторое время назад К. Малсбург, ныне работающий в Рурском

университете в Бохуме, предположил, что никакой проблемы здесь не существовало бы, если бы нейроны, связанные с каким-либо одним объектом, работали синхронно друг с другом (т. е. если бы коррелировали временные характеристики их импульсации), но не синхронно с нейронами, относящимися к другим объектам. Позднее две группы исследователей из Германии сообщили, что, действительно, в зрительной коре кошки можно выявить скоррелированную работу нейронов, часто имеющую ритмический характер с частотой в диапазоне 35—75 Гц и называемую иногда гамма-ритмом или колебаниями с частотой 40 Гц.

Предположение Малсбурга навело нас на мысль, что эта ритмическая и синхронизированная импульсация и могла бы быть нервным коррелятом сознания и служить для координации активностей в разных областях коры, относящихся к одному и тому же объекту. Вопрос этот еще не решен, но имеющиеся на сегодняшний день отрывочные экспериментальные данные эту мысль почти не подтверждают. Другая возможность заключается в том, что колебания с частотой 40 Гц помогают мозгу выделять объект из фона (см. статью: И. Рок и С. Палмер. Наследство гештальт-психологии, «В мире науки», 1991, № 2) или же содействуют механизмам внимания.

Существует ли особый тип нейронов, разбросанных по зрительной коре, чья импульсация непосредственно символизировала бы содержание зрительного сознания? Согласно одной очень упрощенной гипотезе, активность в верхних слоях коры носит главным образом бессознательный характер, а активность в нижних слоях (слои 5 и 6) преимущественно коррелирует с сознанием. Мы решили выяснить, действительно ли актив-

ность пирамидных нейронов (в особенности крупных) 5-го слоя новой коры коррелирует с сознанием.

Пирамидные клетки — единственный тип корковых нейронов, посылающих проекции за пределы кортикальной системы (то есть за пределы новой коры, таламуса или ограды). Если в зрительном сознании представлены результаты вычислительных операций, производимых корковыми нейронами, можно думать, что сигналы, которые кора посылает в другие отделы мозга, и должны, по-видимому, символизировать эти результаты. Кроме того, нейроны 5-го слоя отличаются довольно необычной склонностью разряжаться вспышками импульсов. Предположение, что нейроны 5-го слоя могут прямо символизировать своей активностью зрительное сознание, привлекательно, но пока слишком голословно.

Зрительное сознание — очень сложная проблема. Для ее решения нужны дополнительные психологические и нейрофизиологические исследования как механизмов внимания, так и кратковременной памяти. Плодотворной экспериментальной парадигмой могло бы стать изучение нейронной активности в ситуации, когда перцепт меняется, а зрительный вход остается постоянным. Нужно формулировать новые нейробиологические теории зрительного сознания и проверять их с помощью комплексного молекулярного и нейробиологического подходов, а также клинических.

Мы верим, что, разгадав загадку этой простой формы сознания, можно вплотную подойти к пониманию главной тайны человеческой жизни: как связаны с нашими субъективными ощущениями те физические события, что происходят в мозге, когда мы размышляем и действуем, иными словами, как соотносятся мозг и разум.

Перевод В. Свечникова

Наука и общество

Двухтактный двигатель с чистым выхлопом

ПРОСТОЙ двухтактный двигатель, который долгое время хвалили за его малый размер и ругали за синий дым выхлопа, в настоящее время начал выступать в новой для себя удивительной роли «спасателя окружающей среды». Такой «переквалификацией» он обязан прежде всего корпорации Orbital Engine из Перта (Австралия) — небольшой исследовательской фирме, которая пересмотрела эту конструкцию столетней давности, выведя ее из класса двигателей

для газонокосилок и придав ей новый высокий статус автомобильного двигателя. В этой своей новой роли данный двигатель обладает большей удельной мощностью на фунт, сжигает меньше топлива на милю и «выплевывает» меньше загрязняющих веществ с выхлопом по сравнению с обычным четырехтактным двигателем.

Последняя техническая характеристика является решающей для успеха двигателя. Никакая автомобилестроительная фирма не будет вкладывать деньги в двигатель, не отвечающий новым жестким стандартам на вы-

хлопные газы, принятым в настоящее время в Калифорнии (а также в будущем и в других штатах, собирающихся последовать ее примеру). Эти стандарты начнут действовать в 1997 г., когда уже 2% новых автомобилей должны будут им удовлетворять. К 2003 г. эта цифра повысится до 15%. Еще более «драконовские» правила, предназначенные поощрять развитие альтернативных концепций — таких, например, как электромобили, — требуют нулевого выхлопа, для начала от 2% автомобилей, которые поступят в продажу в 1998 г.

Корпорация Orbital преодолела первый барьер в начале этого года, когда Агентство по защите окружающей среды (EPA) подтвердило, что испытываемый легковой автомобиль «форд» с установленным на нем двигателем Orbital удовлетворяет калифорнийским стандартам на выхлопные газы при пробеге на малые расстояния. Следующий этап, как сказал Питер Саймонз, президент Мичиганского производственного филиала корпорации Orbital, состоит в том, чтобы повторить достигнутый уровень эксплуатационных характеристик на 50-мильном испытании по программе EPA; это необходимо для обеспечения гарантий эксплуатационной стабильности двигателя и его выхлопной системы.

Еще недавно, в 1987 г., крупные автомобильные фирмы США, Европы и Японии заявляли, что смогут «победить» корпорацию Orbital на ее собственном «поле». Хотя большинство из них и продолжает пока свои независимые разработки двухтактного двигателя, многие уже признали, что им придется воспользоваться технологией, запатентованной этой корпорацией. Например, и General Motors, и Ford Motor объявили недавно, что они планируют применять технологию Orbital для некоторых моделей 1995 г.

Принцип рассматриваемого двигателя восходит к концепции Карла Бенца, основателя всемирно известной фирмы Daimler-Benz. В то время как в четырехтактном двигателе один ход поршня используется для нагнетания смеси в камеру сгорания, другой ход — для сжатия этой смеси, третий — для создания усилия в результате вспышки (рабочий ход) и четвертый — для выталкивания продуктов сгорания, в двухтактном двигателе имеет место в два раза большее количество рабочих ходов, что создает почти вдвое большее отношение мощности двигателя к его массе. Опытный двигатель корпорации General Motors, построенный с применением технологии Orbital, «тянет» всего лишь 75 кг по сравнению со 112 кг для



ЭКОЛОГИЧНЫЙ АВТОМОБИЛЬ. Питер Саймонз, глава американского филиала корпорации Orbital Engine, демонстрирует автомобиль «Ethos», на котором установлен двигатель этой фирмы, обладающий высокой топливной экономичностью. Фото: Питера Йейтса.

эквивалентного четырехтактного двигателя.

Снижение веса двигателя наряду со снижением веса опорных конструкций и тормозов повышает и без того высокую топливную экономичность. По словам представителей Orbital, автомобили, оснащенные их двигателем, потребляют топлива на 5—35% меньше, чем сравнимые с ними автомобили с четырехтактными двигателями. Специалисты фирмы утверждают, что легковой автомобиль, разработанный специально под компактный размер двигателя Orbital, может достичь еще большей экономичности.

Автомобили марки «Saab» и другие малолитражные модели, выпущенные до 70-х годов и имевшие обычные двухтактные двигатели, впоследствии исчезли с горизонта. Причина заключалась в том, что они слишком загрязняли атмосферу, так как в выпускной патрубок просачивалось некоторое количество несгоревшего топлива и смазочное масло непосредственно с ним смешивалось. Неодержанные углеводороды окрашивали в синий цвет выхлопной дым маленького «трабанта», выпускавшегося в Восточной Германии — последнего легкового автомобиля с двухтактным двигателем старой модели. Теперь такие двигатели используются лишь для газонокосилок, цепных пил, лодок и тому подобной продукции, для которой вес играет большую роль.

Специалисты фирмы Orbital при-

ступили к решению этой проблемы, применив точную регулировку впрыска воздушно-топливной смеси и введя в конструкцию отдельную систему нагнетания смазки, которая не позволяла маслу контактировать с выпускным патрубком. Затем они приложили все усилия к тому, чтобы поддержать качество выхлопа на уровне все ужесточающихся стандартов на выхлопные газы путем усовершенствования конструкции двигателя и каталитического преобразователя, обеспечивающего окисление загрязняющих веществ в выпускном патрубке.

Представители Orbital заявляют, что у них есть шанс достигнуть уровня «нулевого» стандарта на выхлопные газы. «Мы в настоящее время ведем работу по достижению такого состояния двигателя, которое мы называем «почти нулевой выхлоп», — говорит Саймонз. — Если принять во внимание, что энергия, затрачиваемая на создание электричества, сама по себе не «нулевая», то мы должны составить конкуренцию электромобилям».

Orbital планирует снизить выделение углеводородов в выхлопных газах до концентраций ниже содержания этих веществ в атмосферном воздухе Лос-Анджелеса и Нью-Йорка. «Это весьма интересная идея, — говорит Саймонз. — На наших улицах могут появиться автомобили, которые будут очищать воздух».

Филип Росс

Сколько видов населяет Землю?

Ответа на этот вопрос никто не знает. Между тем он важен в связи с усилиями, направленными на сохранение биологического разнообразия, и мог бы способствовать решению ключевых проблем эволюции и рационального использования окружающей среды

РОБЕРТ М. МЭЙ

Если бы путешественник-исследователь с какой-нибудь другой планеты попал на Землю, то какой вопрос он задал бы прежде всего? Я думаю, он заинтересовался бы, каково разнообразие живых организмов, населяющих нашу планету. В самом деле, существующие на Земле физические условия определяются универсальными причинно-следственными законами, и пришелец, попутешествовавший по Вселенной, нашел бы Землю подобной бесчисленному множеству других миров. Однако особое направление эволюционных сил и переплетение случайных событий, создавшие богатое живое «покрывало» Земли, почти несомненно уникальны.

Как это ни удивительно, но мы не смогли бы ответить на вопрос инопланетянина хотя бы приблизительно. Несмотря на то, что таксономические исследования проводятся на протяжении уже 250 лет, оценки общего числа видов животных, растений и других живых существ сильно расходятся: от 3 до 30 млн. и больше. Поскольку какого-либо Мирового архива не существует, никто не знает даже, сколько видов уже описаны и получили названия.

Ситуация представляется особенно удручающей, если иметь в виду ту скорость, с которой происходит разрушение природных местообитаний. Знать общее число видов и их распространение чрезвычайно важно, если мы хотим сохранить как можно больше еще оставшегося биологического разнообразия. Правительство Великобритании выразило эту идею с предельной ясностью в одном из официальных документов за 1990 г.: «Отправная точка для данного правительства — это этический императив ревностного отношения ко всем проблемам окружающей среды... На нас лежит моральный долг заботиться о нашей планете и передать ее в полном

порядке будущим поколениям».

Перед политическими лидерами стоят обескураживающие экологические проблемы, требующие более глубокого понимания изменений, происходящих в экосистемах по мере вымирания входящих в них видов и замещения их другими формами. А из этой задачи вытекает необходимость исследовать фундаментальную зависимость между разнообразием биологического сообщества и его стабильностью. Важной оказывается связь и с другими проблемами; например прогнозированием климата. В конце концов богатую кислородом земную атмосферу создавали живые организмы, и этот факт лишней раз подчеркивает, насколько тесно переплетены друг с другом экосистемы и атмосфера.

Не следует забывать и о некоторых «повседневных» задачах, требующих подсчета видов и составления их списков. Например, существенная доля современных лекарственных веществ добывается из природных соединений, содержащихся в растениях. Людям следовало бы продолжать свои поиски в кладовой природы, вместо того чтобы разрушать ее. Не в полной мере мы используем и многие питательные плоды и корнеплоды; выращивая их, мы могли бы разнообразить и улучшить продовольственные ресурсы человечества.

«ЗЕМНОЙ РАЙ», картина Яна Брейгеля Старшего. Художник изобразил главным образом полезные или привлекательные виды, поэтому птицам и млекопитающим отведено на ней чересчур много места. Такие исторически сложившиеся перекосы привели к тому, что современные списки видов птиц и млекопитающих оказались почти полными, а все разнообразие таких организмов, как насекомые, пауки, грибы, нематоды и бактерии, продолжает оставаться малоизученным.

Даже в хорошо известных родах культурных растений ученые продолжают открывать новые географические варианты. Такие растения служат сырьем для создания методами селекции и генной инженерии более урожайных и устойчивых к болезням сортов. Достижения современного интенсивного сельского хозяйства сопровождаются опасным снижением

разнообразия выращиваемых растений, что повышает восприимчивость культур к болезням и снижает их устойчивость к колебаниям климата. Возможность разного рода сдвигов в окружающей среде на земном шаре диктует необходимость сохранения генофонда различных растений и изучения возможностей их использования.

ПОПЫТКИ рассматривать органический мир как упорядоченную систему были начаты еще Аристотелем, а возможно, предпринимались и до него. Наука, занимающаяся описанием видов организмов и присвоением им научных названий, известная как таксономия, или систематика, была создана великим естествоиспытателем Карлом Линнеем, работавшим в Упсале в Швеции. Каноническое 10-е издание его книги «Systema Naturae» («Система природы»), содержащей описание примерно 9000 видов растений и животных, было опубликовано в 1758 г. — спустя целое столетие после того, как Исаак Ньютон, опираясь на данные многолетних астрономических наблюдений, при-

шел к аналитическому описанию закона тяготения, позволившему давать научные предсказания.

В течение последующих лет таксономисты постоянно добавляли к списку Линнея описания новых видов, но этот процесс идет очень неравномерно по разным таксономическим группам. Наибольшее внимание уделялось и уделяется животным, обладающим привлекательными оперением или мехом. Ученые почти завершили каталогизацию таких видов. Например, менее чем за сто лет после выхода труда Линнея была описана половина из 9000 известных нам видов птиц. В наше время ученые каждый год открывают лишь от трех до пяти новых видов птиц. То же самое относится к примерно 4000 видов млекопитающих, хотя ежегодно открывают 20 новых видов и один новый род. Около половины открытий составляют виды, которые действительно не были известны (по большей части грызуны, летучие мыши или землеройки), остальные же появляются в результате пересмотра систематики прежних видов на основе современных биохимических данных.

Совершенно в ином положении оказались организмы, не принадлежащие к птицам и млекопитающим. Как показывают данные по все возрастающему числу известных видов паукообразных и ракообразных (т. е. членистоногих, не принадлежащих к насекомым), относительно высокие темпы открытий наблюдались в Викторианскую эпоху, после чего наступило длительное затишье. Больше половины общего числа известных в настоящее время видов добавились буквально в последние десятилетия. В своей недавней работе П. Хаммонд из Лондонского музея естественной истории показал, что с 1978 по 1988 г. число известных видов птиц возросло в среднем лишь на 0,05% в год. За тот же период число описанных видов насекомых, паукообразных, грибов и нематод возросло соответственно на 0,8; 1,8; 2,4 и 2,4% в год.

Такое разнообразие в темпах открытия новых видов отражает до некоторой степени различия в количестве систематиков, занимающихся изучением каждой группы организмов. Точно установить это количество довольно трудно, но примерный под-





КАРЛ ЛИННЕЙ (слева) создал в середине XVIII в. номенклатуру и систему классификации, принятые в современной таксономии. На одной из иллюстраций книги «Systema Naturae» (справа) показано, как он систематизировал растения на основании формы их листьев.



счет исследователей, работающих в Австралии, США и Англии, проведенный К. Гастоном из Британского музея естественной истории и мною, позволяет получить некоторое представление. Если считать, что на каждый вид четвероногих (все позвоночные, за исключением рыб) приходится в среднем N таксономистов, то на каждый вид рыб их приходится примерно 0,3N, а на каждое беспозвоночное — всего лишь от 0,02 до 0,04N. В Северной Америке работают порядка 10 000 таксономистов; всего их в мире, вероятно, втрое больше.

В среднем на каждый описанный вид растений приходится вдвое больше таксономистов, чем на каждый вид животных. В царстве животных каждому виду позвоночных уделяется в среднем в 10 раз больше «таксономического внимания», чем среднему виду растений, тогда как среднее беспозвоночное получает его в 10 раз меньше. Распределение таксономистов явно не соответствует видовому богатству таксонов. Кроме того, в Латинской Америке и в областях Африки, расположенных южнее Сахары, работают лишь 4% таксономистов, а между тем именно эти регионы отличаются наибольшим биологическим разнообразием.



РАЗНООБРАЗИЕ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ приобретает непривычный вид, если распределить организмы в соответствии с их вкладом в общее биоразнообразие, оцениваемое по числу видов в разных группах. Больше половины всех

на Земле обитает не менее 3 млн. видов, т. е. так много, что даже при современных методах исследования открыть и систематизировать их все в обозримом будущем не представляется возможным.

Некоторые авторы пытались оценить общее число видов на земном шаре путем экстраполяции тенденций, наблюдаемых в описании новых видов. Результаты подобных работ сильно зависят от используемых статистических методов. В одном из недавних исследований, в котором для каждой крупной группы организмов использовались различные статистические предсказания в зависимости от положения с описанием новых видов, было сделано заключение, что общее число видов равно 6—7 млн. Другой метод подсчета, основанный на суждениях специалистов в каждой отдельной группе, дал для этого числа верхний предел в 5 млн.

МНОГИЕ предположения основываются на простой интуитивной аргументации, исходящей из относительного обилия видов в различных таксономических группах. В хорошо изученных группах, таких, как птицы и млекопитающие, число тропических видов примерно вдвое больше, чем число видов в умеренных или холодных областях. Однако в том, что касается насекомых, составляющих большую часть всех описанных видов, фауна северных областей изучена гораздо лучше, чем фауна тропиков: примерно две трети всех видов насекомых, получивших названия, обитают за пределами тропического пояса. Если принять, что соотношение между числом видов в тропиках и их числом в умеренных и холодных областях у насекомых такое же, как у млекопитающих и птиц (справедливость этого допущения ничем не доказывается), то в таком случае на каждый уже получивший название вид насекомых из умеренных или северных областей должно приходиться два еще не описанных тропических вида. Такое рассуждение расширяет число описанных видов с 1,5—1,8 млн. до 3—5 млн.

Более прямой способ оценить об-

щее число видов на земном шаре — особенно число видов тропических насекомых — это провести исчерпывающие сборы всех организмов, обитающих в каком-либо малоизученном регионе, и затем определить, какая доля этих растений и животных уже была ранее описана. Такой метод сопряжен с немалыми трудностями: даже в пределах ограниченной тропической области трудно собрать представителей всех видов насекомых. Их определение и классификация — задача еще более обременительная. И при этом нельзя быть уверенным, что данная местность или группа типичны для характера распространения видов вообще.

Я. Ходкинсон и Д. Кассон из Ливерпульского политехнического института в Англии изучили всех полужесткокрылых, или настоящих клопов, в не очень обширной, но разнообразной в топографическом отношении области тропического дождевого леса на Сулавеси (Индонезия). Они собрали 1690 видов наземных клопов, 63% которых ранее не были известны. Если считать такую долю репрезентативной для насекомых вообще, то, имея в виду число всех описанных видов насекомых, т. е. 900 000, можно сделать вывод, что общее их число должно быть равно 2—3 млн.

Хаммонд применил другой вариант этого метода, основанный на изучении локальной популяции. Он установил, что в 22 000 видов насекомых, обнаруженных в хорошо обследованной фауне Британских островов (где по традиции многие поколения священников уделяли своей шестиногой пастве больше внимания, чем двуногой), входит 67 видов бабочек. Многие натуралисты относятся к бабочкам с таким же почтительным вниманием, как к птицам, а поэтому следует полагать, что 17 500 известных нам видов — это почти полный список.



известных видов составляют насекомые, несмотря на то, что, конечно, не все они описаны. В противоположность насекомым млекопитающих насчитывается всего 4000 видов — 0,25% от примерно 1,5 млн. всех описанных видов.

Истинное число почти наверняка не превышает 20 000.

Если считать, что таксономический состав фауны насекомых Британских островов сходен с ее составом по земному шару в целом, то мировая фауна насекомых должна насчитывать примерно 6 млн. видов (22 000 × 20 000 : 67). Подобного рода оценки весьма уязвимы: нельзя быть уверенным, что та или иная группа насекомых или какое-либо определенное место типичны для популяции насекомых вообще.

Т. Эруин из Смитсоновского института возглавил особенно интересное исследование, в котором он и его сотрудники тщательно изучили фауну жуков в пологе тропического леса. Жуки отличаются от прочих насекомых наличием твердых пластинок в форме крыльев, прикрывающих функциональные перепончатые внутренние крылья. Приблизительно из каждых пяти обнаруженных насекомых одно относилось к жукам: английский генетик Дж. Холдейн шутил по этому поводу, что Создатель проявил «неумеренное пристрастие к жукам». Тропические леса отличаются особым разнообразием фауны. Хотя они занимают всего около одной шестнадцатой части всей суши на земном шаре, в них, вероятно, обитает столько же видов, сколько во всех остальных регионах нашей планеты, вместе взятых. Но даже имея это в виду, лишь немногие ученые могли

предвидеть ошеломляющие следствия, вытекающие из работы Эруина.

Опыляя деревья *Leucea seemannii* (тропические родичи липы) инсектицидами, Эруин собирал в Панаме жуков, обитающих в пологе. За три сезона Эруин собрал внушительное число жуков — около 1200 видов. Он пока не разобрал свои сборы, чтобы установить, сколько в них еще не описанных видов, а поэтому приведенный выше метод экстраполяции применить было нельзя. Вместо этого Эруин рассуждал следующим образом.

Во-первых, ему нужно было знать, сколько из собранных им видов жуков живут только на деревьях *L. seemannii*, а не распределяются по деревьям многих разных видов. Эруин полагал, что каждый тропический вид деревьев обитает примерно 20% растительноядных жуков (самая большая группа в его сборах). Исходя из этого, он сделал вывод, что в поло-

1. МЛЕКОПИТАЮЩИЕ	10. КРУГЛЫЕ ЧЕРВИ
2. АМФИБИИ	11. ПЛОСКИЕ ЧЕРВИ
3. БАКТЕРИИ	12. РЫБЫ
4. ГУБКИ	13. ВОДОРОСЛИ
5. ИГЛОКОЖИЕ	14. ПРОТИСТЫ
6. РЕПТИЛИИ	15. ГРИБЫ
7. КИШЕЧНО ПОЛОСТНЫЕ	16. МОЛЛЮСКИ
8. ПТИЦЫ	17. ЧЛЕНИСТОНОГИЕ (НЕ НАСЕКОМЫЕ)
9. КОЛЬЧАТЫЕ ЧЕРВИ	18. РАСТЕНИЯ
	19. НАСЕКОМЫЕ

МАСШТАБ: 1000 ВИДОВ = 6,4 см²

ге деревьев каждого вида обитает в среднем 160 видов жуков. Во-вторых, Эруин на основании числа всех видов насекомых в пологе нашел число видов жуков в нем. Жуки составляют 40% всех известных видов насекомых; если такое соотношение распространяется и на обитателей полога тропических деревьев, то в пологе деревьев каждого вида обитают насекомые 400 видов.

В-третьих, Эруин допустил, что в пологе сосредоточены две трети видов насекомых, обитающих на данном дереве, т. е. что на каждом виде тропических деревьев обитает в общей сложности 600 видов насекомых. Наконец, он принял широко признанную оценку, что на земном шаре произрастает 50 000 видов тропических деревьев. Умножив 600 на 50 000, получим 30 млн. видов насекомых. Общее же число всех видов по всему земному шару, очевидно, должно быть гораздо больше.

Каждое звено в цепи рассуждений Эруина страдает от большой неопределенности. По моему мнению, тропические жуки, как группа, возможно, гораздо менее специализированы, чем жуки умеренного пояса, а в таком случае цифра 20%, взятая Эруином, на самом деле должна быть ближе к 2 или 3%. С другой стороны, Эруин, вероятно, недооценивает число видов на других частях дерева (кроме полога), где, на мой взгляд, должно обитать до двух третей всех видов насекомых.

Если воспользоваться цифрами, которые мне кажутся более реалистичными, то после вычислений число видов насекомых составит 3—6 млн. Тем не менее я считаю работу Эруина важной, поскольку ее отличает целенаправленный подход к оценке числа

существующих видов и стремление подчеркнуть тесное переплетение проблем таксономии и экологии. Эта работа не столько решает вопрос о числе видов на земном шаре, сколько намечает программу исследований.

КОНЕЧНАЯ цель составления каталога всего биологического разнообразия заключается в создании реальной основы для ответа на главные вопросы об эволюции и экологии. Таксономические списки служат отправными точками для изучения структуры пищевых цепей, относительного обилия видов, числа видов или общего числа организмов различных физических размеров и общих тенденций в численности и распределении живых организмов. В некоторых из подобного рода исследованиях предлагаются обобщенные подходы, дающие возможность оценивать число видов другими независимыми методами.

Один такой метод основан на изучении характера распределения числа видов наземных животных по разным категориям в зависимости от общих размеров тела. В целом, как установили систематики, с уменьшением длины тела животного в 10 раз число видов, относящихся к данной категории размеров, возрастает в 100 раз. Эта закономерность сохраняется для животных в диапазоне длины от нескольких метров до одного сантиметра.

При длине менее одного сантиметра эта зависимость нарушается, возможно, из-за крайней неполноты данных об очень мелких наземных животных. Если формально экстраполировать характер указанного выше соотношения на животных, длина которых равна примерно одному милли-

метру (принятая граница раздела между макро- и микроскопическими животными), то получится, что общее число видов наземных животных на земном шаре должно быть равно примерно 10 млн. Такая чисто феноменологическая оценка была бы более убедительна, если бы таксономисты лучше понимали физиологические, экологические и эволюционные факторы, обуславливающие распределение числа видов по размерам тела.

(Это правило проливает свет на проблему, вставшую перед Ноем в связи с емкостью его ковчега. Ученые мужи нередко высказывались в том смысле, что Ною пришлось бы поломать голову, как взять на борт все бесчисленное множество видов насекомых. Но если 10-кратное уменьшение линейных размеров, которое эквивалентно 1000-кратному уменьшению в объеме, приводит к увеличению числа видов всего лишь в 100 раз, то трудность состояла лишь в том, чтобы разместить самых крупных животных.)

Общий принцип структуры пищевых цепей дает возможность подсчитать число видов на другой основе. Органическое вещество, создаваемое растениями в процессе фотосинтеза, образует первое звено пищевой цепи. Если бы удалось получить детальные данные о том, сколько других форм жизни способен прокормить каждый вид растений, то на основании имеющихся у нас сравнительно полных данных о числе видов растений можно было бы вывести общее число видов организмов.

Несмотря на то что ученые еще очень далеки от осуществления этой светлой мечты, Гастон продолжил более ранние исследования пищевых

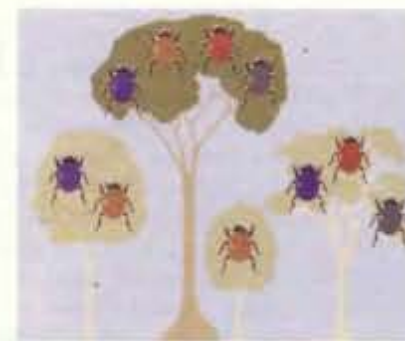
цепей, собирая имеющиеся данные о среднем числе видов насекомых, связанных с каждым видом растений, в сообществах, сильно различающихся по величине и местонахождению. Он обнаружил, что в среднем на каждый вид растений приходится 10 видов насекомых. Исходя из того, что по достаточно обоснованной оценке общее число видов сосудистых растений равно 27 000, Гастон приблизительно оценил число видов насекомых в 3 млн.

Все наши рассуждения до сих пор касались главным образом подсчета видов наземных насекомых и по вполне веской причине: эти существа уже составляют больше половины описанных видов и тем не менее до полного их каталога еще очень далеко. Однако некоторые другие таксономические группы по своему разнообразию вполне могут поспорить с насекомыми. Особенно это касается мелких или невзрачных организмов, которым, вероятно, уделяется несоразмерно мало внимания.

Д. Хоксуорт из Международного микологического института в Кью (Великобритания) пересмотрел оценку общего числа видов в сторону увеличения, по меньшей мере столь же резко, как и предложенное в работе Эруина по насекомым. Хоксуорт обратил внимание на то, что таксономистами описано примерно 69 000 видов грибов. В Англии и в других хорошо обследованных северных регионах Европы число видов грибов в шесть раз выше числа видов сосудистых растений. Если такое же соотношение существует по всему земному шару, то, следовательно, 270 000 описанных видов сосудистых растений соответствует 1,6 млн. видов грибов, т. е. в 20 с лишним раз больше, чем нам известно в настоящее время.

Разумеется, биологические закономерности, наблюдаемые в умеренных зонах, не обязательно распространяются на тропические сообщества. Может оказаться, что в тропиках каждый вид связан с более широким кругом растений, чем в умеренной зоне; если так, то отношение между числом видов грибов и растений должно быть меньше. В свою очередь Хоксуорт не учитывает грибы, связанные не с растениями, а с насекомыми, что уменьшает его оценку. В недавних работах, проведенных в отдельных тропических районах, доля неописанных прежде грибов колеблется от 15 до 30%, что значительно ниже 95%, следующих из подсчетов Хоксуорта. Вместе с тем эти работы отнюдь нельзя рассматривать как обобщающие; соответственно было бы неправильно ожидать, что они раскроют

Оценка разнообразия насекомых по методу Эруина



Число видов жуков, найденных в пологе деревьев одного вида, служит основой для оценки разнообразия. Строго говоря, число видов жуков, специализированных к жизни на этих деревьях, определяется как все виды жуков, живущих на деревьях только этого вида, половина видов, живущих на деревьях двух видов, треть видов — на деревьях трех видов и так далее.



Насекомые, не относящиеся к жукам, составляют примерно 60% всех видов насекомых на всем земном шаре. По приблизительным оценкам Т. Эруина из Смитсоновского института, 160 видов жуков специализированы к жизни в пологе тропического дерева *Luehea seemannii*. Если виды жуков составляют 40% всех видов насекомых, то к этим деревьям должно быть специализировано 400 видов насекомых.



Насекомые живут также в других частях дерева — в его стволе и корнях, а также в окружающей почве, покрытой листьями. Эруин полагает, что две трети всех видов насекомых живут в пологе, а это означает, что с каждым деревом связано 600 видов насекомых.



В тропических лесах произрастает около 50 000 видов деревьев. Если в среднем с каждым из них связано по 600 видов насекомых, то в тропических лесах обитает огромное число видов насекомых — 30 млн. (50 000 × 600). Полученный Эруином результат носит, однако, гипотетический характер, и его, возможно, следует уменьшить в пять раз или даже более.



ЧИСЛО ВИДОВ, описываемых таксономистами, возрастало разными темпами для разных групп организмов. Половина всех известных видов птиц была открыта до 1845 г.; каждый год к ним добавляется всего несколько видов

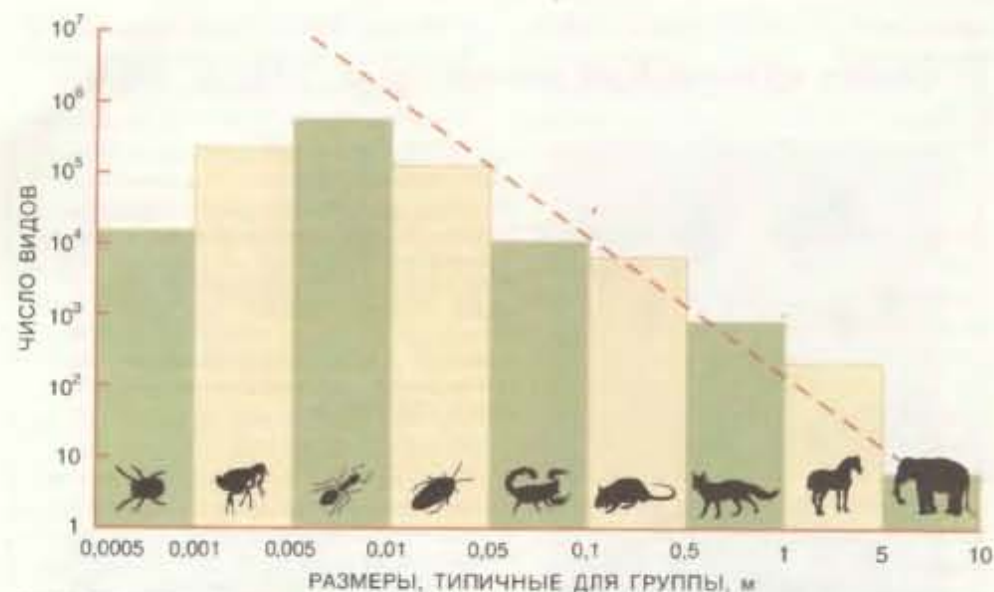
(слева). В противоположность этому большинство описанных видов паукообразных и ракообразных были обнаружены лишь после 1960-х гг. (справа).

во всей полноте проблему неописанных видов.

Отрывочные данные о числе видов грибов не дают представления об их роли как жизненно важных элементов большинства экосистем, способствующих разрушению органических веществ и формированию новой почвы. Грибы, несомненно, принимали участие в создании биологического разнообразия прежде всего тем, что способствовали заселению растениями суши, а затем, особенно благодаря симбиотическим взаимоотношениям, — расселению сосудистых расте-

ний, насекомых и других организмов. Столь важная роль грибов в биоте Земли заслуживает большого внимания.

Из всех животных, которых можно увидеть невооруженным глазом, хуже всего каталогизированы нематоды. Многие из этих крошечных червей паразитируют на растениях и животных, но среди них есть и свободноживущие формы, как пресноводные, так и морские. К 1860 г. было известно только 80 видов нематод. На сегодняшний день их описано примерно 15 000. Результаты недавних исследо-



ЗАВИСИМОСТЬ числа видов от размеров дает возможность приблизительно определить это число. В целом число видов мелких животных всегда больше, чем число крупных. Зависимость эта как будто нарушается для организмов, длина которых меньше одного сантиметра, возможно, потому, что систематики не уделяют должного внимания таким видам. Если считать, что данная зависимость сохраняется для организмов длиной менее одного миллиметра, то общее число видов должно составлять примерно 10 млн.

ваний по наземным и пресноводным нематодам позволяют считать, что зарегистрированные виды составляют лишь ничтожную долю общего их числа в этой группе. Другие работы свидетельствуют о том, что в морской среде их разнообразие даже еще больше. Лишь немногие таксономисты готовы возразить Хаммонду, оценивающему число видов нематод по крайней мере в несколько сотен тысяч.

САМЫЕ мелкие живые существа, которых невозможно увидеть невооруженным глазом, также вносят большой вклад в общее число видов. Такие микроскопические организмы, как протисты, бактерии и вирусы, составляют лишь 5% всего списка известных видов. Недавние исследования показали, однако, что природные популяции этих организмов гораздо более разнообразны, чем это представляется при изучении прививочных лабораторных культур. Исследование РНК, выделенной из скопления фотосинтезирующих бактерий в горячем источнике в Йеллоустонском национальном парке, обнаружило восемь генетических последовательностей, ни одна из которых не совпала с последовательностями, типичными для 12 лабораторных штаммов бактерий, считавшихся характерными для таких скоплений. Только одна из восьми найденных последовательностей была хоть в какой-то степени сходна с последовательностями, принадлежащими одному известному типу бактерий.

Биологи, изучавшие последова-

тельности рибосомной РНК из природных популяций морских организмов, получили в общем аналогичные результаты. Эти исследования в некоторых отношениях еще более примечательны, чем открытия, сделанные в пологе тропических лесов, потому что они продемонстрировали, как удивительно мало известно систематикам о простейших, широко распространенных формах жизни.

Задача определения систематического статуса бактерий и вирусов осложняется тем, что различные штаммы легко обмениваются генетическим материалом и что от одного родительского индивидуума путем клонирования может возникнуть целая популяция. Кроме того, некоторые вирусы заметно мутируют от года к году; поэтому для микроорганизмов критерии определения видового статуса не так ясны, как для позвоночных. М. Эйген из Биофизического института им. Макса Планка в Гёттингене и П. Шустер из Венского университета считают, что основной единицей классификации для многих вирусов должен быть квазивид — вполне определенный набор хорошо выраженных последовательностей РНК. Естественный отбор действует не на вирусный вид как таковой, а на квазивидовое скопление.

Вклад микроорганизмов и нематод в общий генофонд может быть поразительно велик. Согласно одному доводу поверхностному, но не лишеному оснований суждению, каждый вид насекомых и сосудистых растений (которые в совокупности составляют львиную долю всех описанных

видов) содержит по одному специализированному к нему паразиту из числа нематод, протистов, бактерий и вирусов. Если это так, то все приведенные выше оценки числа видов следует автоматически умножить на пять. В таком случае общее число видов потенциально может превысить 100 миллионов, хотя я и сомневаюсь, что оно может быть настолько велико.

Подсчеты видов не лишены пользы, поскольку вид — это зримая и хорошо определенная мера генетической единственности. В то же время многие эволюционные проблемы или практические цели заставляют исследователей обращаться к разнообразию на более высоких и более низких уровнях таксономического разнообразия.

Поднимаясь вверх по лестнице таксономической иерархии — от видов через роды, семейства, отряды и классы до типов, — мы обнаруживаем все более глубокие генетические различия между группами. Например, в океане обитает менее 15% всех описанных видов. Но при этом свыше 90% всех классов организмов и по существу все типы представлены в морской среде. Более того, две трети всех типов встречаются только в море. Следовательно, если говорить о диапазоне планов строения тела организмов, то разнообразие животных в море гораздо больше, чем на суше.

Заглядывая на другой конец этой иерархии, специалисты по охране природы интересуются генетическими различиями между представителями одного вида. Когда какой-либо вид приближается к вымиранию, его генетическая изменчивость исчезает и эту потерю нельзя восстановить с помощью программ по разведению. Поэтому изучение разнообразия в пределах вида позволяет определить, до какой степени дошло невозвратимое истощение изменчивости вида, находящегося на пути к вымиранию. С помощью генетических исследований можно также установить, не приблизился ли данный вид к вымиранию в не слишком отдаленном прошлом.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ каталогизации живых организмов требует огромных координированных и длительных усилий, и я думаю, что они оправданы. Проблема сохранения окружающей среды будет требовать все большего вмешательства в экосистемы и управления ими.

Человечество должно также решить проблему разнообразия живых существ — сколько их и почему — по тем же причинам, по которым человек стремится понять происхождение и судьбу Вселенной или последова-

тельность молекул в своем геноме, кодирующую построение его собственного организма. В отличие от других проблем, однако, изучение и сохранение биологического разнообразия жестко ограничены во времени. Ежегодно от 1 до 2% тропических лесов на земном шаре уничтожаются людьми для того, чтобы использовать землю под сельское хозяйство, а древесину на топливо и в качестве сырья. При таких темпах тропические леса исчезнут за какие-нибудь 50 лет.

Учитывая, что срок этот очень короткий, перед таксономистами стоит задача — создать нестандартные подходы к каталогизации разнообразия. Один из таких методов состоит в том, чтобы призвать к помощи непрофессионалов (называемых «босоногими систематиками») для сбора и первичной разборки экземпляров на скорую руку. Такие помощники могут собрать большую часть нужных данных гораздо быстрее, чем понадобилось бы при соблюдении всех принятых в науке правил. Упрощенные программы таксономических исследований впервые начали применять Р. Гомец и другие из Национального института биологического разнообразия на Коста-Рике; аналогичную работу финансирует Австралия.

Другие подходы к проблеме основаны на использовании современных технологий. Ученые могли бы собирать, хранить и распространять информацию о видах на дискетах компьютеров. Можно разработать эффективные программы, позволяющие проводить проверку видов, пользуясь систематизированной базой данных. Это позволило бы в корне изменить трудоемкую работу по отделению новых видов от уже известных и определению их места в системе. Можно было бы прибегнуть также к голографии, что дало бы возможность хранить в очень компактной форме всю информацию и легко извлекать ее, когда требуется. Централизованная австралийская база данных уже обладает некоторыми из этих новых возможностей. При широком и творческом использовании современная информационная технология может открыть доступ к обширным европейским коллекциям тем, кто лишен таких возможностей.

Я убежден, что наши потомки будут недоумевать, почему в конце XX в. Линней продолжал так сильно отставать от Ньютона. Их, вероятно, огорчит также — как должно бы огорчать людей сегодня, — что наше общество тратило так мало средств и усилий на установление числа форм жизни и сохранение их многообразия, которые определяют единственную в своем роде красоту Земли.

Наука и общество

Космический мираж?

ПОЯВИВШЕЕСЯ в апреле 1992 г. сообщение о том, что спутник по исследованию космического фонового излучения COBE (Cosmic Background Explorer) обнаружил слабые вариации в микроволновом фоновом излучении, было расценено многими астрономами как давно ожидаемое доказательство существования зародышей галактик в ранней Вселенной. Спустя шесть месяцев они все еще убеждены в том, что космическое фоновое излучение и его вариации представляют собой «реликтовый остаток» излучения, возникшего при рождении Вселенной. Однако возник спор, имеют ли измерения на спутнике COBE какое-либо отношение к строению Вселенной несколько миллиардов лет назад.

Л. Краус и М. Уайт из Йельского университета утверждают, что вариации в космическом микроволновом фоновом излучении могут быть следствием теории относительности: вариации, говорят они, могут быть неоднородностями, вызванными гравитационными волнами. «Но не следует сразу же делать вывод о том, что данные наблюдения со спутника COBE представляют собой просто флуктуации плотности, — предупреждает Краус. — По крайней мере часть вариаций или все они могли бы быть обусловлены гравитационными волнами».

Десятилетиями астрономы наделись обнаружить вариации в слабом свечении микроволнового излучения, высвобожденного при конденсации вещества в охлаждающейся Вселенной в течение первых 300 тыс. лет ее эволюции. Поскольку современная Вселенная заполнена такими сгустками вещества, как звезды и скопления галактик, космологи предсказали, что и ранняя Вселенная также была неоднородна. И если вещество и энергия были неравномерно распределены в молодой Вселенной, то это скупивание должно проявляться в виде флуктуаций микроволнового фонового излучения. В плотных областях Вселенной испускание излучения было бы ограничено (см. статью: Кори Пауэлл. Золотой век космологии, «В мире науки», 1992, № 9).

Однако, как впервые показал в 1979 г. А. А. Старобинский из Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау в Москве, эффекты общей теории относительности также могли повлиять на распределение микроволнового фонового излучения. Общая теория относительности описывает

пространство как прочную, неподатливую структуру. Но искривление пространства пропорционально содержащейся в нем массе. Теория объясняет, каким образом сила тяготения является следствием кривизны пространства. В теории также предсказывается, что если масса движется с большой переменной скоростью, то она может вызывать «рябь» в структуре пространства. Эта «рябь», называемая гравитационными волнами, сжимает и расширяет пространство по мере распространения сквозь него.

Возможным источником таких волн является так называемая инфляционная фаза Вселенной. Согласно этой теории раздувающейся Вселенной, в течение доли секунды после начала расширения Вселенная расширилась примерно в 10^{30} раз. Такое быстрое раздувание («инфляция») могло породить широкий диапазон гравитационных волн. В номере журнала «Physical Review Letters» от 10 августа 1992 г. Краус и Уайт опубликовали свои расчеты, которые показывают, что гравитационные волны достаточной длины могут быть ответственны за все вариации космического фонового микроволнового излучения.

В частности, некоторые гравитационные волны могли иметь длину, сравнимую с размером Вселенной. Под воздействием таких волн огромные области космического пространства могли слегка расширяться или сжиматься. В результате некоторые области излучали сильнее, чем другие, и это различие выявилось бы в распределении микроволнового фонового излучения.

Согласно Краусу и Уайту, эти эффекты способны замаскировать признаки флуктуаций плотности, которые могли служить зародышами галактик. Не все космологи считают эти расчеты столь убедительными. «При наиболее вероятных предположениях, — говорит М. Риз из Кембриджского университета, — гравитационными волнами обусловлены менее 10% вариаций фонового излучения».

Астрономам придется ждать годы, чтобы решить эту проблему. Измерения с детекторов гравитационных волн, эксперименты в физике элементарных частиц или высокочувствительные измерения микроволнового фонового излучения могут дать ответы на возникшие проблемы. Все три вида исследований могут оказаться столь же грандиозными проектами, как и сам проект COBE.

Квантовая криптография

Уже несколько столетий математики пытаются найти такую систему кодирования информации, которая позволяла бы двум лицам обмениваться сообщениями абсолютно секретно.

Заметный прогресс в этом направлении достигнут в последнее время за счет

объединения квантовой механики с криптологией

ЧАРЛЗ Г. БЕННЕТ, ЖИЛЬ БРАССАР, АРТУР К. ЭКЕРТ

В СВОЕМ классическом рассказе «Золотой жук», опубликованном в 1843 г., Эдгар По объясняет основы расшифровки криптограмм и высказывает мнение, что любой придуманный человеком шифр можно разгадать. За прошедшие с тех пор полтора века в состязании между шифровальщиками и дешифровальщиками отмечалось немало интересных поединков, которые могли бы порадовать По. В 1918 г. был изобретен неподдающийся разгадке шифр, однако его неразгадываемость была доказана только в 40-е годы. Этот шифр был малопригоден для практического использования, поскольку отправитель и получатель криптограммы должны были заранее договориться о ключе, представляющем собой большой набор случайных секретных чисел, часть которых использовалась при каждой передаче криптограммы. Более приемлемые с практической точки зрения шифры с короткими повторно используемыми ключами (или вообще без секретных ключей) были изобретены в 70-е годы, но до сих пор они остаются предметом математической забавы, поскольку их еще никому не удалось разгадать, хотя и неразгадываемость их пока не доказана.

Наблюдаемый в последние годы неожиданный прогресс в криптографии связан с применением в этой области квантовой механики, которая позволяет сделать то, что не под силу одной математике. В таких криптографических квантовых системах обычно используются отдельные кванты света (фотоны), и работа их основана на принципе неопределенности Гейзенберга, согласно которому процедура измерения какого-либо параметра квантовомеханической системы в общем случае неизбежно привносит в нее определенное возмущение и результат измерения дает неполную информацию о состоянии

системы до измерения. Поэтому подслушивание информации, передаваемой по квантовому каналу связи, невозможно без внесения в сообщения искажений, которые могут быть обнаружены абонентами канала. Использование этого эффекта в квантовой криптографии позволяет двум лицам, никогда прежде не встречавшимся и заранее не обменивавшимся никакой секретной информацией, абсолютно тайно обмениваться информацией «под носом» у пытающегося перехватить ее противника. Квантовые методы также позволяют решить ряд специфических задач, важных в период после окончания холодной войны. Так, с их помощью две взаимно не доверяющие друг другу стороны могут принять совместное решение на основе конфиденциальной информации, почти не раскрывая друг другу ее секреты.

ИСКУССТВО криптографии зародилось по крайней мере 2500 лет назад и с тех пор все время играло важную роль в истории. Одна из наиболее знаменитых шифровок, письмо Циммермана, подтолкнуло США к вступлению в первую мировую войну. Когда в 1917 г. шифровка была разгадана, американцы узнали, что Германия пыталась вовлечь в войну Мексику, обещая ей в случае победы часть американских территорий.

Примерно в это время Гильберт С. Верман из Американской телефонной и телеграфной компании (AT&T) и майор Джозер О. Мауборже из войск связи США разработали первый по настоящему неподдающийся разгадке код, называемый шифром Вермана (см. текст в рамке на с. 132). Характерной особенностью этого кода является наличие ключа, длина которого должна быть не меньше длины передаваемого сообщения и который никогда не используется повторно при передаче другого сообщения.

(Шифр Вермана иногда называют также одноразовым блокнотом из-за того, что секретным агентам он доставляется в виде блокнота с отрывными листами, причем каждый лист используется один раз и после этого тщательно уничтожается.) Появление шифра Вермана осталось почти незамеченным в свое время, видимо, потому, что нераскрываемость шифра не была строго доказана в то время, а также из-за необходимости иметь массивный ключ, что делало его малопригодным для широкого применения.

Вследствие этих ограничений военные и дипломаты продолжали пользоваться более уязвимыми шифрами с короткими ключами. Поэтому во время второй мировой войны союзники по антигитлеровской коалиции смогли прочесть большую часть секретных сообщений, которыми обменивались Германия и Япония. Хотя применявшиеся в то время шифры и были в принципе раскрываемыми, разгадка их представляла собой довольно сложную задачу. Можно сказать, что трудность в разгадывании все более усложнявшихся шифров была одним из факторов, способствовавших быстрому развитию вычислительной техники.

Научный интерес к криптологии возрос в середине 70-х годов, когда Уитфилд Диффи, Мартин Э. Хеллман и Ральф К. Меркл, работавшие тогда в Станфордском университете, открыли принципы шифрования с открытыми ключами (ШОК). Вскоре после этого в 1977 г. Рональд Л. Ривест, Ади Шамир и Леонард М. Адлеман, работавшие тогда в Массачусетском технологическом институте, разработали практические подходы к реализации этих принципов (см. статью: Martin E. Hellman, The Mathematics of Public-Key Cryptography, Scientific American, August, 1979).

Шифросистемы с открытыми ключами отличаются от всех ранее использованных схем тем, что в них стороны, желающие установить секретную связь, не должны заранее договариваться о секретном ключе шифра. Основная идея ШОК для пользователя, которого мы в дальнейшем будем называть Алисой, заключается в случайном выборе двух взаимно обратных преобразований, которые будут использоваться для шифрования и дешифрования сообщений. Затем Алиса публикует правила по шифрованию сообщения, но не по их расшифрованию. Другой абонент, которого мы будем называть Бобом, может затем воспользоваться этим описанным Алисой алгоритмом и составить шифrogramму, которую сможет прочесть только он. Таким образом, Алиса и Боб могут установить канал секретной связи, хотя первоначально у них не было никакого совместного секрета. Криптосистемы с открытым ключом хорошо подходят для шифрования электронной почты и коммерческих транзакций, которыми часто обмениваются стороны, не предвидевшие ранее (в отличие от дипломатов и шпионов) необходимость установления секретного канала связи.

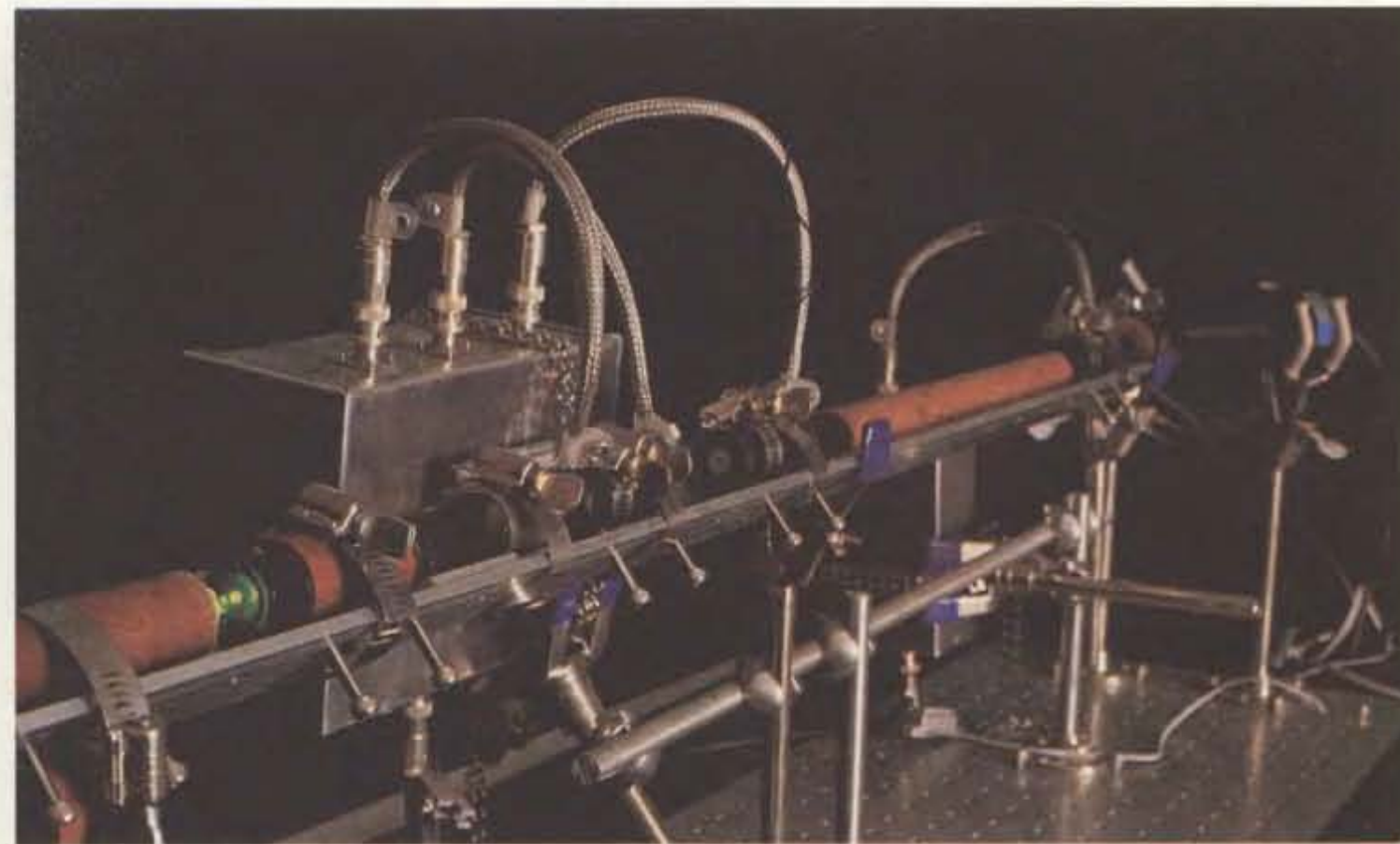
Эти достоинства частично умя-

ются тем обстоятельством, что системы с открытыми ключами не являются абсолютно секретными. Так, в 1982 г. Шамир, работающий сейчас в Институте Вейсмана в Израиле, разгадал одну из первых криптосистем с открытыми ключами — «рюкзачный» шифр. Эдгар По мог бы улыбнуться на том свете, зная, что имеется хитрый, но пока еще неоткрытый метод атаки, который может «взломать» любой из этих шифров за несколько минут.

ЗА НЕСКОЛЬКО лет до появления криптографии с открытыми ключами незаметно произошло еще одно выдающееся событие — объединение криптографии с квантовой механикой. Примерно в 1970 г. Стефан Дж. Уайзнер, работавший тогда в Колумбийском университете, написал статью под названием «Сопряженное кодирование», в которой объясняется, как постулаты квантовой физики можно использовать (по крайней мере в теории) для реализации двух задач, неразрешимых с точки зрения классической физики. Одна из задач — способ производства банкнот, физически неподдающихся подделке. Вторая задача — схема объединения двух классических сообщений в одной квантовой передаче, из которой при-

емник может извлечь любое из этих сообщений, но не оба сразу. К сожалению, статья Уайзнера не была принята журналом, в который он послал ее, и она оставалась неопубликованной до 1983 г. Тем временем в 1979 г. двое из нас (Беннет и Brassar), знакомые с идеями Уайзнера, начали думать над тем, как объединить эти идеи с криптографией с открытыми ключами. Вскоре мы поняли, что эти идеи позволяют создать альтернативу для ШОК: два пользователя, не имевшие первоначально никаких общих секретов, могут установить между собой тайный канал связи, но теперь этот канал будет обладать абсолютной и строго доказанной секретностью и будет защищен невозможностью нарушить известные физические законы.

Первые квантовые криптографические схемы, разработанные нами в период с 1982 по 1984 г., были малопригодны для практического применения, но в 1989 г. сделанные нами усовершенствования позволили построить в Исследовательском центре имени Томаса Дж. Уотсона фирмы IBM полностью работающий прототип квантового канала секретной связи. Джон Смолли, штатный сотрудник Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, помог нам собрать



КВАНТОВОЕ УСТРОЙСТВО испускает и измеряет очень слабые вспышки поляризованного света, обеспечивая тем самым секретную передачу информации (см. рисунок на

с. 136, 137). Каждая вспышка в среднем состоит всего из одной десятой доли фотона.

Шифр Че Гевара

Когда в 1967 г. боливийские вооруженные силы захватили и убили революционера Че Гевара, они нашли при нем листок бумаги, на котором было указано, как он подготавливал сообщения президенту Кубы Фиделю Кастро. Гевара пользовался неподдающимся разгадке шифром, изобретенным Гилбертом Вернамом в 1918 г. Каждая буква текста посланий (на испанском языке) сначала переводилась в одно или двухзначное десятичное число в соответствии с приведенной таблицей:

A 6	E 8	I 39	M 70	Q 71	U 52	Y 1
B 38	F 30	J 31	N 76	R 58	V 50	Z 59
C 32	G 36	K 78	O 9	S 2	W 56	
D 4	H 34	L 72	P 79	T 0	X 54	

Фактически такая процедура не обеспечивает полной защиты. Все цифры в тексте затем разбивались на группы по 5 цифр. Они размещались в верхней строчке каждой группы из трех строк. Средняя строка в каждой группе была ключом, представлявшим собой последовательность случайных цифр, известную только Гевара и Кастро.

0 2 1 8 4	8 7 6 7	0 8 7 6 2	6 3 1 8 3	7 6 4 8 7	0 6 2 6 7	6 7 0 6 1
4 9 8 6 4	6 8 4 3 2	4 6 0 5 1	8 7 9 3 1	7 8 2 7 2	0 3 0 3 3	4 6 7 3 1
6 9 1 4 0	1 0 3 7 9	4 9 7 1 3	4 0 0 1 4	4 4 6 7 9	0 9 2 8 0	0 7 7 5 4
2 3 7 7 7	4 8 2 7 7	4 5 8 6 7	0 8 7 0 9	5 8 3 7 5	7 6 5 8 8	7 2 3 7 7
6 2 7 7 3	4 1 1 4 5	4 2 3 5 7	4 7 4 5 1	4 2 1 3 3	7 1 3 7 0	4 8 5 1 1
8 5 6 8 0	0 9 3 3 8	0 7 1 1 4	4 5 8 5 4	1 0 4 2 8	7 5 7 2 8	1 7 8 2 7
4 3 0 8 5	8 7 0 8 9	5 8 6 7 2	7 1 5 7 8	7 2 8 4 3	8 3 7 0 7	4 7 8 7 6
4 8 7 9 4	0 7 8 8 1	4 9 1 2 5	5 0 0 7 8	4 2 2 8 2	4 8 6 5 6	8 7 7 1 6
0 1 7 8 7	8 4 8 6 9	7 6 9 9 7	5 1 5 1 4	3 4 7 2 2	2 1 3 9 5	2 8 7 8 6
3 2 7 2 6	5 0 8 3 3	8 2 0 8 8	2 8 7 2 7	6 8 6 2 6	3 1 8 3 3	7 8 1 1 1
8 4 7 2 0	1 8 4 7 1	7 8 2 1 3	7 6 4 7 4	3 8 8 3 0	4 2 5 4 8	6 2 6 3 0
1 6 2 7 6	6 9 2 0 4	5 0 2 9 1	9 4 3 1 1	5 6 4 9 6	7 3 3 7 3	3 5 7 4 1
7 7 7 7 7	2 8 3 6 6	5 8 7 7 6	4 6 7 0 0	9 7 6 1 3	0 5 8 6 7	6 3 2 3 7
1 2 3 4 5	3 5 6 0 1	7 4 5 0 8	5 2 0 4 8	5 7 8 2 1	5 2 5 0 4	7 8 6 4 3
8 7 7 7 1	5 3 5 6 7	4 2 4 7 4	9 8 7 2 8	4 4 4 8 4	5 7 3 6 1	3 1 8 7 2
2 1 7 3	7 8 2 0 8	7 6 9 2 6	3 8 3 7 6	3 2 6 7 6	0 3 7 4 6	4 1 4 8 3
6 7 6 1 8	0 0 6 2 1	0 7 4 0 8	7 5 5 7 1	6 7 2 3 0	6 7 8 0 8	8 1 7 2 4
8 0 0 0 1	7 8 2 2 9	7 3 3 2 9	0 3 8 8 1	9 7 8 0 6	4 0 7 4 4	2 8 1 7 5
1 5 4 3 7	7 6 8 5 8	4 8 7 6 7	2 6 7 7 6	3 9 2 7 7	9 3 7 8 7	6 2 7 4 6
2 2 8 7 7	3 0 5 4 2	3 8 0 9 1	4 8 1 4 9	4 5 4 2 3	4 6 1 2 5	7 3 1 7 1
3 1 2 2 1	0 6 9 1 0	2 6 7 5 8	6 1 8 4 7	4 7 7 4 0	3 9 7 0 2	3 5 0 4 7
5 8 7 2 8	7 3 3 3 3	0 8 0 7 7	1 5 8 8 2	8 5 8 5 0	6 5 8 7 2	8 8 7 2 8
0 4 3 6 9	2 5 6 6 7	3 2 2 4 7	8 8 0 1 1	1 2 7 8 3	3 2 3 7 1	8 2 7 0 5
5 4 0 8 2	9 8 3 3 2	3 2 7 1 4	9 3 7 9 3	4 7 7 3 3	7 7 1 5 3	0 0 5 1 3

Затем послание и ключ складывались (без переноса разряда), образуя шифrogramму, помещаемую в каждую третью строку. Поскольку цифры ключа были случайными, сумма (шифrogramма) тоже получалась набором случайных цифр, не несущих никакой информации о тексте сообщения тому, кто не знал ключа. Затем шифrogramма передавалась на Кубу по незащищенному каналу, например на коротких волнах по радио. Секретная служба Кастро производила вычитание тех же цифр ключа и восстанавливала последовательность цифр верхнего ряда, а затем переводила их в буквы, получая текст сообщения.

В XX в. шифром Вернама широко пользовались шпионы и дипломаты. Ключ в этом шифре может быть представлен не десятичными цифрами, а случайной последовательностью двоичных 0 и 1; операции сложения и вычитания в этом случае выполнялись бы машиной по соответствующим правилам двоичной системы, а не вручную, как в десятичной системе. Тем не менее этот ключ все же нужно вручную транспортировать от места, где он составляется, к месту его использования, и при доставке необходимо принять меры для защиты ключа от перехвата противником.

радиоэлектронные и оптические части аппаратуры, а Франсуа Бессет и Луис Салвейл из Монреальского университета помогли написать программное обеспечение для экспериментального прототипа. Примерно в это же время теоретические идеи Дэвида Дойча из Оксфордского университета привели одного из нас (Экерта) к изобретению несколько иной криптосистемы, работающей на основе квантовых корреляций. В начале 1991 г. Джон Рерити и Поль Тепстер из Исследовательского агентства министерства обороны Великобритании и Массимо Палма из Университета Палермо приступили к экспериментальной реализации криптосистемы Экерта.

Чтобы понять принцип работы таких систем, рассмотрим более подробно некоторые математические аспекты классической криптографии, в частности роль ключа. Ранее секретность шифра зависела в основном от секретности самих процедур шифровки и расшифровки. В настоящее время основные процедуры шифровки и расшифровки обычно широко известны, а секретным является ключ шифра. В таких шифрах ключ используется для управления процессом кодирования и декодирования шифrogramмы таким образом, чтобы противник, перехвативший это криптосообщение и знающий методы кодирования, но не ключ, не смог извлечь ничего полезного из зашифрованного сообщения. Поэтому шифровку можно передавать по обычным каналам связи, например по радиосвязи, или надежно защищенному секретному каналу связи, например передать его на тайной встрече или доставить с доверенным курьером. Хотя передача ключа по секретным каналам связи является весьма дорогостоящим мероприятием, она позволяет впоследствии обмениваться зашифрованными сообщениями по общедоступным дешевым каналам связи.

Степень засекреченности, в конечном счете, зависит от длины ключа. В 1940 г. Клод Шеннон, работавший тогда в Bell Laboratories, опубликовал две статьи, в которых блестяще показал, что если длина ключа меньше длины зашифрованного сообщения, то противник, вооруженный мощными средствами дешифровки, сможет извлечь из шифровки некоторую полезную для себя информацию. Такая возможная утечка информации не зависит от степени сложности применявшегося алгоритма шифрования сообщения. Напротив, сообщение может быть абсолютно защищено от расшифровки противника в таких криптосистемах, как код Вернама, в

которых ключ имеет такую же длину, как и закодированные с его помощью сообщения, строится чисто случайным образом и используется только один раз.

ОДНАКО даже шифр Вернама секретна система доставки и хранения ключа. Из-за значительных сложностей, связанных с необходимостью обеспечивать новым секретным ключом каждое сообщение, шифр Вернама мало применяется в обычной коммерческой практике, хотя он традиционно используется в дипломатической связи, например по линии «горячей» связи между Москвой и Вашингтоном. В противоположность этому в наиболее широко используемом коммерческом шифре, называемом Стандартом кодирования данных, применяется секретный 56-битовый ключ, который через определенный период времени повторно используется для передачи хранения секретных ключей, но все же не устраняет ее.

Имеется еще одна фундаментальная проблема. В принципе любой классический закрытый канал связи может тайно подслушиваться противником, причем отправитель и получатель сообщений не будут знать о том, что их сообщения «перехватываются». Например, ключ, перевозимый доверенным курьером, может быть прочитан по дороге тайным компьютерным томографом высокого разрешения или каким-нибудь другим современным устройством отображения информации так, что сам курьер об этом не будет подозревать. Вообще говоря, классическая физика, т.е. теория, описывающая макро-

скопические тела и явления, к которым можно отнести бумажные документы, магнитные ленты с записью и радиосигналы, позволяет произвести измерения всех физических свойств объекта без изменения этих свойств. Поскольку кодирование любой информации, включая шифровальные ключи, связано с поддающимися измерению физическими характеристиками некоторого объекта или сигнала, то классическая физика допускает возможность тайного подслушивания, поскольку она в принципе позволяет измерять физические свойства, не внося в них при этом никаких искажений.

В квантовой теории, на которой основана квантовая криптография, такая ситуация уже исключается. Считается, что квантовая теория описывает поведение всех объектов, как больших, так и малых, но ее следствия наиболее заметно проявляются в микроскопических системах, например в отдельных атомах или субатомных частицах. Сам процесс измерения является составной частью квантовой механики, а не пассивным внешним процессом, как в классической физике. Поэтому возможно сконструировать такой квантовый канал связи (т.е. канал, в котором передача сигналов основана на квантовых явлениях), что любая попытка подслушать передаваемое по каналу сообщение неизбежно исказит в заметной степени передаваемый сигнал. Такой эффект возникнет вследствие того, что в квантовой теории некоторые пары физических параметров объекта являются взаимно дополняющими в том смысле, что изменение одного параметра неизбежно изменяет значение

другого параметра. Это утверждение, называемое принципом неопределенности Гейзенберга, не связано с ограничениями какого-либо конкретного процесса измерения, оно справедливо для всех возможных способов измерения.

Пользуясь принципом неопределенности, можно сконструировать полностью секретный канал связи, в котором для передачи информации использовались бы квантовые свойства света. Мельчайшая частица, или квант, света — это фотон, который можно представить в виде крошечного колеблющегося электромагнитного поля. Направление колебаний этого поля называется поляризацией фотона. Обычный свет состоит из фотонов с различными случайно направленными поляризациями. Если свет пропустить через поляризационный фильтр, подобный тому, который используется в солнцезащитных очках, то через фильтр пройдут фотоны только с определенным направлением поляризации. Направление пропускаемой поляризации зависит от ориентации фильтра. В солнцезащитных очках фильтры расположены так, чтобы пропускать вертикально поляризованный свет, поскольку такой свет отражается от горизонтальных поверхностей с меньшими бликами и сиянием. Но если очки повернуть на 90° так, чтобы одно стекло располагалось над другим, они начнут пропускать горизонтально поляризованный свет и в результате будут не ослаблять блики, а усиливать их.

ДЛЯ создания квантового канала связи необходим поляризационный фильтр либо другое устройство,



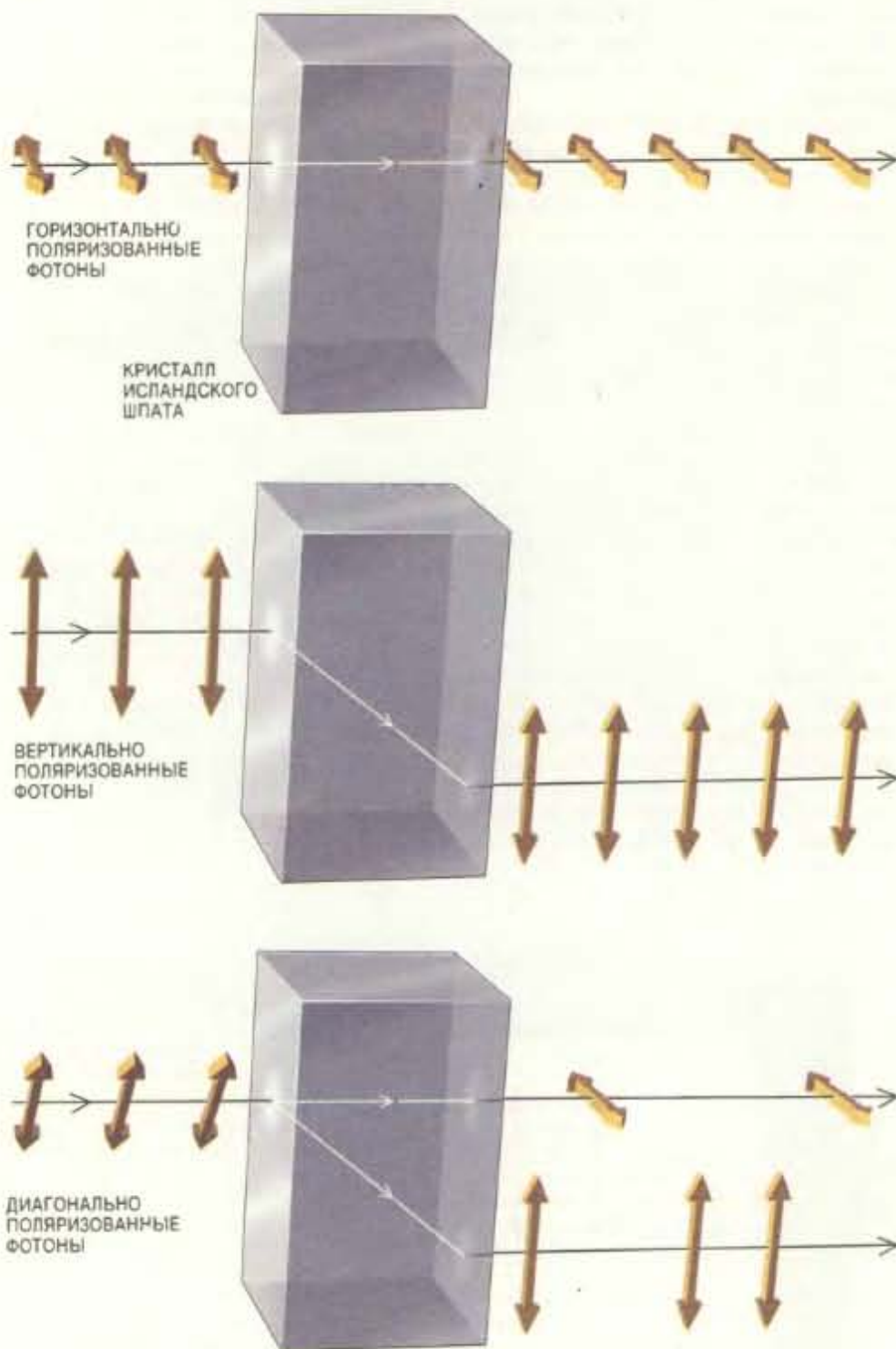
НЕПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ проходит через фильтр, который поглощает часть света и поляризует оставшуюся его часть в вертикальном направлении. Второй фильтр, который повернут на некоторый угол по отношению к первому

фильтру, поглощает часть поляризованного света и пропускает другую его часть, придавая ему новое направление поляризации.

с помощью которого передатчик сможет получить фотоны выбранной поляризации. Для приемника также необходимо какое-то устройство, которое будет измерять поляризацию фотонов. Измерить поляризацию можно с помощью еще одного поляризационного фильтра, который будет поглощать попадающие в него фотоны с «неправильной» поляризацией. Однако измерение поляризации проще выполнить с помощью дву-

чепреломляющего кристалла (например, исландского шпата), который не поглощает попадающие в него фотоны, а разделяет их по двум направлениям в зависимости от ориентации их поляризации (см. рисунок внизу).

Фотон, попадающий в кристалл исландского шпата, может распространяться в одном из двух направлений в зависимости от ориентации его поляризации относительно кристалла. Он может пройти «прямо» через кри-



КРИСТАЛЛ ИСЛАНДСКОГО ШПАТА для выделения вертикально и горизонтально поляризованного света. Горизонтально поляризованный свет проходит прямо через кристалл, в то время как вертикально поляризованный свет отклоняется в сторону. Если на кристалл попадает свет с диагональной ориентацией поляризации, он будет случайным образом переполаризован в вертикальном или горизонтальном направлении и соответственно смещен или нет.

сталл (без какого-либо отклонения) и выйти из кристалла поляризованным перпендикулярно оптической оси кристалла. Он может также сместиться в сторону и выйти из кристалла поляризованным вдоль оптической оси кристалла. Если попадающий в кристалл фотон уже поляризован по одному из этих двух возможных направлений, его поляризация не изменится, но в зависимости от ее ориентации он обязательно пойдет в кристалле по прямому или отклоненному пути. Если попадающий в кристалл фотон поляризован по некоторому промежуточному направлению (по отношению к двум выделенным кристаллом направлениям), он может с некоторой вероятностью пойти по одному из двух возможных направлений и приобретет поляризацию, характерную для выбранного направления; исходная поляризация при этом будет потеряна. Наиболее случайным поведение фотона будет в том случае, если он поляризован ровно «посередине» между двумя поляризациями кристалла, т.е. под углом 45 или 135° к ним. Такие фотоны с одинаковой вероятностью могут пойти по одному из двух разрешенных кристаллом направлений. Они «забывают» свою начальную поляризацию, и ее направление (45 или 135°) потом уже невозможно установить никакими средствами.

Предположим, что Бобу заранее известно, что данный фотон поляризован по одному из «прямолинейных» направлений, вертикальному (0°) или горизонтальному (90°), но неизвестно, по какому именно. Тогда он сможет надежно измерить направление поляризации фотона, направив его в прибор, состоящий из вертикально ориентированного кристалла исландского шпата и двух фотоприемников, например фотоумножителей, которые могут зарегистрировать отдельные фотоны. Кристалл исландского шпата направит фотон на верхний фотоприемник, если он был горизонтально поляризован, и на нижний фотоприемник, если он был вертикально поляризован. Такой прибор бесполезен для измерения поляризации «диагональных» (под углом 45 или 135°) фотонов, но такие фотоны можно надежно различить друг от друга аналогичным прибором, повернутым на угол 45° относительно своей исходной ориентации. Повернутый прибор, в свою очередь, будет бесполезен для различения фотонов с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Согласно принципу неопределенности, эти ограничения присутствуют не только описанному здесь конкретному варианту измерительного

прибора, но и любому измерительному прибору какой угодно конструкции. Прямолинейная и диагональная поляризации являются взаимно дополнительными свойствами фотона в том смысле, что измерение любой из этих характеристик неизбежно придает совершенно случайное значение другой характеристике.

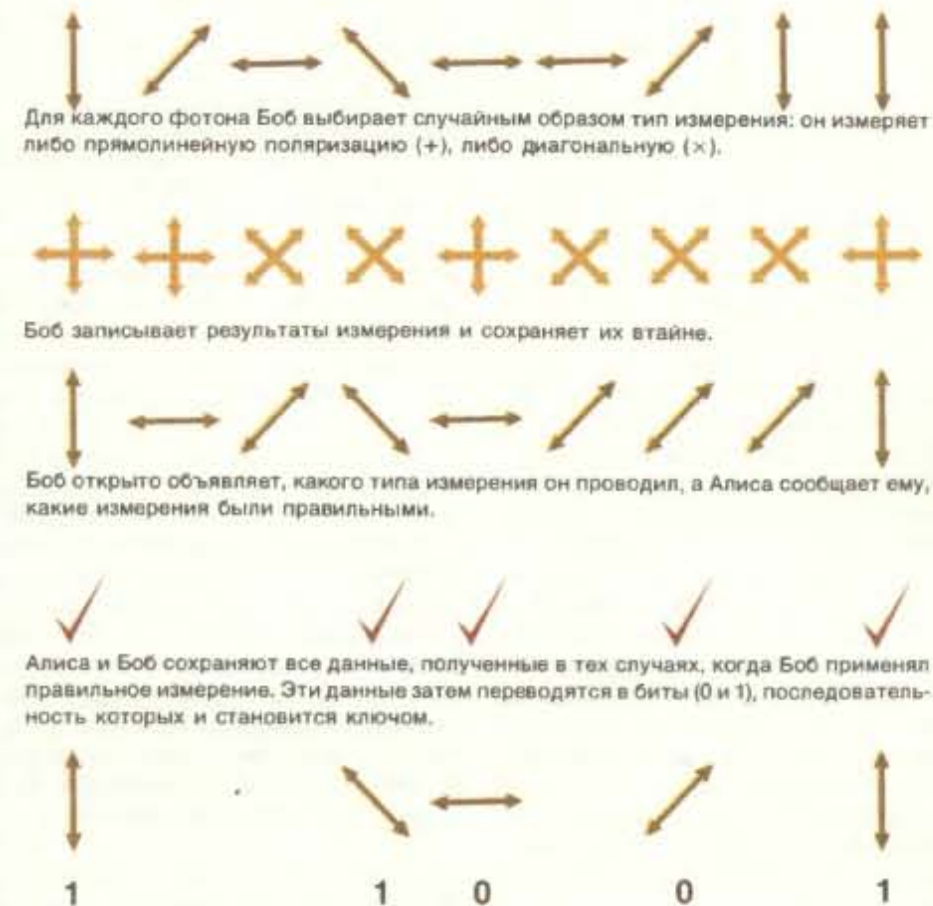
Теперь мы можем описать простую схему квантовой доставки ключа шифра, которую двое из нас (Беннет и Brassar) предложили в 1984 г. и которую мы сокращенно будем называть ББ. Эта схема позволяет Алисе и Бобу обменяться секретным случайным ключом шифра, который они смогут впоследствии использовать, как и в шифре Вернама, для передачи секретных сообщений по мере необходимости. Как и в любой другой квантовой схеме доставки ключа, в схеме ББ84 используется квантовый канал связи, по которому Алиса и Боб посылают поляризованные фотоны. Кроме того, в этой схеме используется классический общественный канал связи, по которому они обмениваются обычными сообщениями. Подслушивающий противник, которого мы назовем Евой, может измерять фотоны в квантовом канале связи, но, как уже отмечалось выше, она в общем случае не может провести измерения, не исказив состояние фотона. Более того, Ева может узнавать содержимое всех сообщений, посылаемых по общественному каналу связи, но предположим, что она при всем своем желании не может изменить или исказить содержимое этих сообщений.

АЛИСА и Боб используют общественный канал связи для обсуждения и сравнения данных, переданных по квантовому каналу связи; за счет такой проверки они могут установить факт подслушивания в квантовом канале. Если подслушивание не будет обнаружено, они смогут выделить из всей массы переданных данных некоторый объем случайной информации, которая заведомо секретна, т.е. известна только им двоим, несмотря на какую угодно степень технической оснащенности Евы и мощь имеющейся в ее распоряжении вычислительной техники (см. текст в рамке справа).

Эта схема работает следующим образом: сначала Алиса создает и пересылает Бобу последовательность фотонов, поляризация которых случайным образом выбирается по четырем возможным направлениям, а именно 0, 45, 90 и 135°. Боб принимает эту последовательность фотонов и измеряет их поляризацию, причем для каждого из них он случайным образом решает, какая именно поляризация

Квантовый способ передачи ключа

Квантовая криптографическая система может позволить двум людям, скажем Алисе и Бобу, обмениваться секретным ключом. Такая система включает передатчик и приемник. Алиса использует передатчик, чтобы послать фотоны в одной из четырех плоскостей поляризации: 0, 45, 90 или 135°. Боб использует приемник, чтобы измерить поляризацию. По законам квантовой механики приемник может различить прямолинейную поляризацию с ориентацией 0 и 90° или его можно быстро перестроить, чтобы он смог различить ориентацию диагональной поляризации 45 и 135°. Он, однако, никогда не может произвести различие в обоих случаях. Распределение ключа требует нескольких этапов. Алиса посылает фотоны, имеющие одну из четырех возможных поляризаций, которую она выбирает случайным образом.

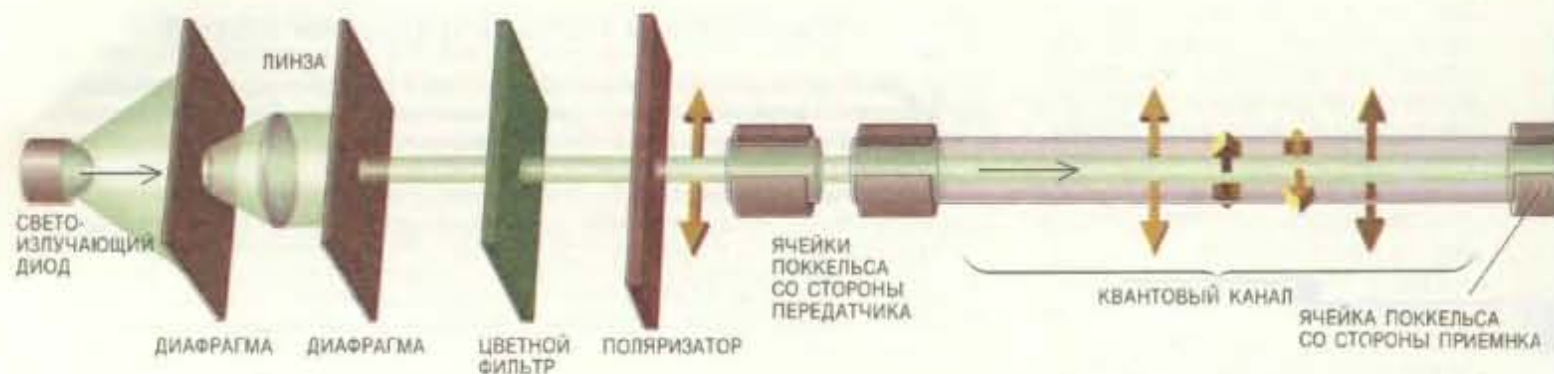


(прямолинейная или диагональная) будет измеряться.

Затем Боб публично объявляет, какого типа измерение (прямолинейное или диагональное) он сделал для каждого фотона последовательности, но сохраняет в тайне результаты этих измерений (например, 0, 45, 90 и 135°). Алиса публично отвечает ему, правильный ли тип измерения был сделан для каждого фотона. Алиса и Боб затем отбрасывают все те фотоны, для которых Боб сделал измерение неверного типа, а также те случаи, когда приемники Боба вообще не зарегистрировали фотонов (существующие на сегодня фотоприемники не обладают 100-процентной эффективностью). Если сообщение, передаваемое по квантовому каналу связи, никто не пытался подслушивать, то

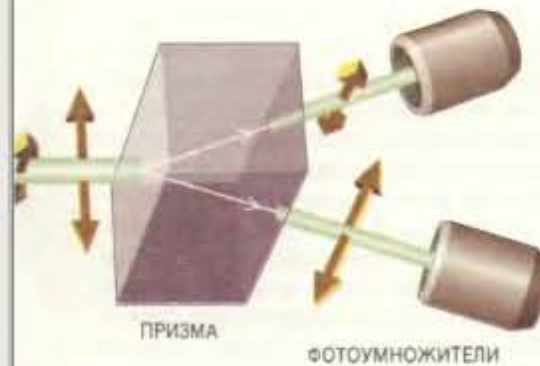
оставшиеся результаты измерений поляризации составляют секретную информацию, которая известна только Алисе и Бобу.

Затем Алиса и Боб проводят проверку на подслушивание. Для этого они по общественному каналу связи сравнивают случайно выбранный набор данных из всего массива измерений поляризации, и этот набор исключается из массива секретной информации. Если сравнение выбранного набора укажет на наличие подслушивания, Алиса и Боб отбросят весь массив результатов измерений и проведут новый сеанс связи с новой последовательностью фотонов. Если же подслушивание не будет отмечено, они примут все оставшиеся результаты измерений о которых никогда не упоминалось по общественному кана-



КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ могут передавать информацию, обеспечивая полную секретность. Светоизлучающий диод передатчика излучает слабые вспышки зеленого цвета. Диафрагма, линза и фильтр создают коллимированный (параллельный) пучок света чрезвычайно малой интенсивности. Затем свет поляризуется в горизонтальном направлении. Две ячейки Поккельса поворачивают плоскости по-

ляризации, задавая ориентацию под углом 0, 45, 90 или 135°. Вспышки поляризованного света выходят из передатчика и попадают на приемник. Там другая ячейка Поккельса либо поворачивает поляризацию света еще на 45°, либо нет. Таким образом, ячейка позволяет приемнику выбрать измерение прямолинейной или диагональной поляризации света. В случае прямолинейной поляризации фотон



с горизонтальной поляризацией будет направлен на правый фотоумножитель, фотон с вертикальной поляризацией — на левый фотоумножитель.

мом трубам. Однако квантовый канал связи должен конкурировать с классическими каналами связи, которые гораздо дешевле, когда они используются на дальние расстояния, и могут обеспечить вполне удовлетворительную степень секретности передачи.

Вспомним, что в схеме ББ84 каждый бит информации кодируется одним поляризованным фотоном. В отличие от этого в экспериментальном прототипе каждый бит кодируется слабой вспышкой света. Это приводит к появлению угрозы неконтролируемого подслушивания в квантовой системе. Если Ева на пути света поставит полупрозрачное зеркало, она сможет разделить каждую вспышку на две вспышки меньшей интенсивности, измерить одну из них своим собственным анализатором поляризации, а вторую вспышку переслать Бобу неискаженной. Если Ева будет забирать себе незначительную часть интенсивности вспышки, то Боб может не заметить ослабление своего сигнала или может посчитать, что это ослабление связано с естественным ослаблением света при передаче. Такой способ подслушивания может быть эффективно исключен за счет уменьшения скорости передачи данных по квантовому каналу. Для этого Алисе надо посылать очень слабые вспышки света — такие, что интенсивность вспышки в среднем будет составлять менее одного фотона. Такие сверхслабые вспышки света можно легко получать с помощью ослабляющих фильтров.

При передаче вспышек света с малой интенсивностью шансы Боба зарегистрировать фотон соответственно уменьшаются, но вероятность того, что Боб и Ева одновременно зарегистрируют фотоны одной и той

же вспышки, уменьшается еще быстрее, поскольку эта вероятность обратно пропорциональна квадрату интенсивности. В реально работающей аппаратуре используются вспышки, интенсивность которых составляет примерно одну десятую фотона. С другой стороны, если передаваемые Алисой вспышки света будут достаточно яркими (например, тысячи фотонов в одной вспышке), они станут легкой добычей для подслушивающего, использующего разделение пучка. Отводя лишь малую долю интенсивности, Ева смогла бы получить достаточное количество фотонов для того, чтобы одновременно выполнить прямолинейные и диагональные измерения поляризации, т.е. достоверно определить состояние поляризации. Другими словами, чем ярче передаваемые Алисой вспышки, тем больше у них будет сходства с классическими сигналами, о которых подслушивающий противник может получить полную информацию, не внося заметных искажений.

Другая практическая проблема возникает из-за того, что имеющиеся фотоприемники иногда могут зарегистрировать сигнал даже в отсутствие фотона. Такие «шумовые импульсы» и другие несовершенства аппаратуры приводят к появлению ошибок даже при отсутствии подслушивания. При этом вариант отбрасывания данных при обнаружении в них ошибки, предложенный в «идеальном» протоколе ББ84, становится малопригодным для практики. Если Боб и Алиса обнаружат в своих данных небольшое количество ошибок, они должны придумать какой-то способ для их исправления и использования в качестве секретного ключа. С другой стороны, если ошибок будет слишком много, что указывает на наличие подслушивающего противника, то данные необходимо отбросить и весь сеанс связи следует провести заново.

Существует множество различных методов, с помощью которых Алиса и Боб могут исправить небольшое количество ошибок, например они могут использовать коды с автоматической коррекцией ошибок. Но такие методы чреватые потенциальной утечкой информации к Еве, которая может внимательно следить за публично проводящимся по общедоступным каналам связи обсуждением. Таким образом, после квантовой передачи и обсуждения ее результатов с корректировкой ошибок у Алисы и Боба будут данные, которые они должны рассматривать в качестве «нечистого» ключа, поскольку некоторая часть всего массива информации не является секретной. Информация об

этом ключе может попасть к Еве несколькими путями. Она может добыть информацию путем деления некоторых вспышек, прямым измерением нескольких других вспышек (она не может часто проводить такие измерения, поскольку они вызывают ошибки в данных Боба) или слежением за ходом публичного обсуждения данных между Алисой и Бобом. К счастью, Алиса и Боб знают интенсивность световых вспышек и количество исправленных ими ошибок, поэтому они могут оценить, какое количество информации могло попасть к Еве через эти каналы утечки.

Сам по себе такой нечистый ключ является почти бесполезным. Если, например, его использовать в качестве ключа для шифра Вернама, то может случиться так, что наиболее важная часть сообщения будет закодирована известной противнику частью ключа. К счастью, двое из нас (Беннет и Brassar) совместно с Джин-Марком Робертом (который тогда учился у Brassara в Монреальском университете) разработали некоторый математический метод, называемый усилителем секретности. С помощью этого метода Алиса и Боб в ходе публичного обсуждения могут выделить из такого частично секретного ключа высокосекретный ключ меньшего объема, о котором подслушивающий противник знает гораздо меньше одного бита. Основная идея усиления секретности для Алисы и Боба после того, как подслушивание уже состоялось, заключается в том, чтобы выбрать некоторую функцию уменьшения длины. После применения этой функции к имеющемуся у них нечистому ключу частичная информация противника о массиве их данных преобразуется практически в отсутствие какой-либо информации о выходных данных функции.

Например, если исходный массив данных состоит из 1000 бит, из которых Ева знает не более чем о 200, то Алиса и Боб могут выделить около 800 высокосекретных битов. Можно доказать, что для этого вполне достаточно простых методов, причем Алиса и Боб при выборе функции, о выходных данных которой Ева не будет иметь никакого представления, даже не должны знать, какой именно информацией об их массиве данных располагает противник. В частности, Алиса и Боб могут определить каждый выходной бит функции как четность независимого публично оговоренного случайного набора битов из их полного массива. Примерно также Алиса и Боб поступали при проверке их данных на идентичность с помощью контроля по четности, но те-

лу связи, в качестве секретного двоичного ключа, известного только им двоим. Для этого можно интерпретировать горизонтальные и 135-градусные фотоны как двоичные нули, а вертикальные и 45-градусные фотоны как двоичные единицы.

Из-за принципа неопределенности Ева не может одновременно измерить прямолинейную и диагональную поляризацию у одного фотона. Если для какого-то фотона она выполнит измерение неверного типа, то, несмотря на то что она отошлет Бобу фотон, поляризация которого согласуется с ее результатом измерения, она неизбежно исказит и сделает случайной поляризацию, посланную первоначально Алисой. В результате при подслушивании примерно в одной четверти принятых Бобом битов данных будут ошибки.

Описанное выше прямое сравнение выбранных битов полного массива данных не является эффективным, поскольку для получения высокой степени уверенности в идентичности данных Боба и Алисы приходится жертвовать слишком большим числом битов, особенно в случае, если подслушивание велось нерегулярно для небольшого числа фотонов и привело всего к нескольким ошибкам. Бобу и Алисе гораздо лучше сравнить «четность» некоторого оговоренного по общедоступному каналу связи случайного набора битов, содержащего примерно половину битов их данных. Например, Алиса может сообщить Бобу: «Я беру первый, третий, четвертый, девятый... девятсот девяносто шестой и девятсот девяносто девятый биты из моего набора в 1000 бит, и в этих выбранных битах содержится четное количество единичных битов». Затем Боб должен подсчитать количество единиц в тех

же битах его массива данных. Если суммарное число его единиц окажется нечетным, он немедленно делает вывод о том, что его данные не совпадают с данными Алисы. Можно показать, что если данные Боба и Алисы отличаются, то сравнение четности случайно выбранного набора битов из этих данных с вероятностью 50% может обнаружить факт различия независимо от числа и расположения ошибок по битам (но в сравниваемый набор должна попасть хотя бы одна ошибка. — *Перев.*) Для уменьшения вероятности не заметить факт подслушивания до одной миллионной достаточно повторить такую проверку по четности 20 раз на двадцати различных случайных наборах битов.

НЕСКОЛЬКО видоизмененная схема ББ84 использовалась для создания работающего прототипа квантового канала связи в фирме IBM (см. рисунок сверху). Изменения схемы были необходимы для преодоления таких практических проблем, как шум в фотоприемниках и использование вместо отдельных фотонов слабых вспышек света.

Весь квантовый канал связи вместе с передатчиком Алисы на одном конце и приемником Боба на другом конце помещен в светонепроницаемый корпус. Во время работы вся эта установка управляется персональным компьютером, в котором имеются отдельные программы, представляющие Алису, Боба и (необязательно) Еву.

Левая часть передающей аппаратуры Алисы состоит из светоизлучающего диода (он испускает зеленый свет), линзы, диафрагмы и фильтров, которые создают коллимированный пучок горизонтально поляризованного света. Для изменения первоначаль-

ной горизонтальной поляризации в любую из четырех стандартных поляризаций используются специальные электрооптические приборы, так называемые ячейки Поккельса. Управляя ими, Алиса изменяет поляризацию света точно так же, как если бы ее изменяли механическим поворотом поляризационного фильтра в четыре различных стандартных положения, однако ячейки делают это намного быстрее.

Приемная аппаратура Боба, расположенная на другом конце квантового канала связи, состоит из аналогичной ячейки Поккельса, которая позволяет ему мгновенно выбирать тип измеряемой поляризации без физического поворота регистрирующего устройства. После прохождения через ячейку Поккельса свет в аппаратуре Боба попадает на поляризационную призму из исландского шпата, которая разделяет его на два перпендикулярно поляризованных пучка и направляет эти пучки на два фотоприемника для регистрации отдельных фотонов.

Передающая и приемная аппаратура в этом прототипе разделена расстоянием всего лишь около 30 см. Столь малое расстояние было выбрано в основном для того, чтобы весь прототип имел приемлемые размеры и мог уместиться на рабочем столе. Однако нет никаких принципиальных ограничений на увеличение расстояния между передатчиком и приемником. Например, квантовые сообщения можно пересылать на несколько километров по волоконно-оптическому кабелю. Если отвлечься от проблем стоимости и удобства использования, то квантовые сообщения можно пересылать с незначительными потерями на сколь угодно далекие расстояния по вакуумированным пря-

перь они не будут публично объявлять о четности выбранных наборов битов, а, наоборот, сохраняют эти сведения в секрете.

ПРОБЛЕМА обеспечения секретности ключа не решается полностью абсолютно тайной его доставкой. Другим слабым местом является хранение ключа. После того как Алиса и Боб договорились о совместном секретном ключе, они должны хранить его до тех пор, пока не возникнет нужда в его использовании. Но чем дольше они будут хранить ключ, допустим в секретном сейфе, тем больше вероятность доступа к нему постороннего лица. Хотя современная конструкция сейфа может в значительной степени затруднить проникновение в него постороннего лица, законы физики всегда допускают возможность нарушения секретности. Как ни удивительно, но можно сконструировать такую криптосистему, которая будет гарантировать секретность доставки и хранения ключей за счет использования квантовых корреляций. Принцип работы такой криптосистемы основан на интерпретации знаменитого парадокса Эйнштейна—Подольского—Розена (ЭПР) в версии Дейвида Боба (см. статью: Bernard d'Espagnat, *The Quantum Theory and Reality*, "Scientific American", November, 1979).

Эффект ЭПР возникает, когда сферически симметричный атом излучает два фотона в противоположных направлениях к двум наблюдателям, Алисе и Бобу. Первоначально эти два фотона рождаются с неопределенными поляризациями. Но вследствие симметрии первоначального состояния поляризации этих фотонов при измерении должны оказаться противоположными по величине при условии, что над обоими фотонами проводятся измерения одинакового типа. Например, если и Алиса, и Боб измеряют прямолинейную поляризацию, то каждый из них с равной вероятностью может зарегистрировать либо 0 (горизонтальная поляризация), либо 1 (вертикальная поляризация), но если Алиса получает 0, то Боб неизбежно должен получить 1, и наоборот.

Необычным и очень важным аспектом эффекта ЭПР является то, что поляризация обоих фотонов принимает определенное значение, как только (но не ранее!) предпринимается попытка измерить поляризацию одного из фотонов. Это происходит независимо от того, как далеко друг от друга находятся фотоны в момент измерения. «Классическое» объяснение эффекта ЭПР в какой-то степени противоречит здравому смыслу, и в действительности все классические

объяснения парадокса ЭПР включают в себя некоторый элемент неправдоподобности, например мгновенное действие на большом расстоянии. Математически строгий аппарат квантовой механики, однако, может прямо объяснить парадокс ЭПР, и проведенные эксперименты дали достаточно подтверждений существованию эффекта ЭПР.

Используя эффект ЭПР, один из нас (Экерт) недавно придумал криптосистему, в которой гарантируется как секретность доставки, так и секретность хранения ключа. В упрощенной версии этой системы, описанной Дейвидом Мермином из Корнеллского университета, Алиса создает последовательность пар ЭПР фотонов, оставляет по одному фотону из каждой пары у себя, а остальные посылает Бобу. Алиса и Боб сразу же измеряют поляризацию некоторых из этих фотонов для проверки на подслушивание и хранят остальные фотоны, не измеряя их поляризацию. Затем, непосредственно перед применением ключа, они измеряют и сравнивают некоторые из хранящихся фотонов. Если никто не проводил никаких измерений над этими фотонами, то Боб всегда будет получать 1, когда Алиса получает 0, и наоборот. Если никаких различий при таком контрольном сравнении не будет обнаружено, то Алиса и Боб измеряют поляризацию оставшихся хранящихся фотонов и получают тем самым необходимый им ключ.

Хотя теоретически такая процедура работает, на практике ее нельзя использовать, поскольку хранить фотоны дольше, чем малая доля секунды, технически невозможно. Поэтому эффект ЭПР для проверки секретности хранения ключа в настоящее время не используется.

ХОТЯ криптография наиболее широко применяется в секретной связи, в мирное время она может оказаться исключительно важной для двух других случаев. Первый — это удостоверение подлинности сообщения, когда необходимо подтвердить, что оно действительно пришло от лица, которое его подписало, и что оно не было изменено в процессе передачи. Второй случай — это сохранение конфиденциальности некоторой частной информации в то время, когда она используется для принятия публичных решений.

Практически во все известное нам историческое время подлинность удостоверилась такими физическими средствами, с трудом поддающимися подделке, как печати и подписи. Эти традиционные атрибуты официаль-

ных документов обеспечивают их секретность в ограниченной степени, и для защиты компьютерных документов, например банковских транзакций, которые часто передаются по общедоступным линиям связи, они вообще не могут использоваться.

К счастью, для подтверждения подлинности цифровых сообщений существует несколько математических методов. В 1979 г. сотрудники фирмы IBM Марк Вегман и Лоуренс Картер предложили схему подтверждения подлинности цифрового сообщения, которая обладает доказываемой секретностью. Как и в коде Вернама, в этой схеме требуется, чтобы отправитель и получатель сообщения заранее договорились о совместном секретном ключе, часть которого используется при каждой проверке подлинности сообщения.

Схему проверки подлинности Вегмана—Картера и квантовую передачу ключей можно использовать совместно, что обогащает возможности обоих этих методов. С одной стороны, квантовые методы передачи предоставляют секретные двоичные биты ключа, необходимые для проведения проверки на подлинность. С другой стороны, метод проверки Вегмана—Картера можно использовать для успешного выполнения квантовой передачи ключа даже в присутствии весьма «коварного» неприятеля, который в отличие от Евы может не только подслушивать все переговоры по общедоступным линиям связи, но и изменять содержимое передаваемых публичных сообщений.

Квантовая криптография может также оказаться полезной для защиты конфиденциальной информации, когда она необходима для публичного принятия решений. Классическим примером такого «осторожного» принятия решений без раскрытия всей информации является так называемая «проблема свидания», когда два лица пытаются найти способ провести свидание в том и только том случае, если они нравятся друг другу, без раскрытия какой-либо дополнительной информации. Например, если Алисе нравится Боб, но Бобу не нравится Алиса, то свидание должно быть отменено, причем Боб не должен узнать, что он нравится Алисе. С другой стороны, в этой ситуации Алиса с логической неизбежностью поймет, что она не нравится Бобу, поскольку в противном случае свидание состоялось бы.

Имеется большое множество других ситуаций, в которых совместное решение, принимаемое некоторыми корпоративными структурами или государственными организациями,

зависит от закрытой информации, которую договаривающиеся стороны не желали бы полностью предоставлять друг другу. «Осмотрительное» решение проблемы свидания или любого другого совместного решения, зависящего от конфиденциальной информации, может быть получено, если Алиса и Боб раскроют свои секретные данные доверенному посреднику (например, Еве) и предоставят ей право принимать решение. Недостатки такого решения проблемы очевидны: и Алиса, и Боб должны верить, что Ева примет правильное решение и никогда никому не раскроет известной ей секретной информации.

Существуют различные другие методы, которые позволяют принять публичное решение на основе секретной информации без помощи доверенного посредника. Например, можно составить протокол ведения переговоров между большим количеством участников, который не позволит получить совместное решение только в том случае, если большинство участников сговорятся предоставлять ложную информацию или раскрывать известные им секреты. Однако, если две стороны доверяют секретности криптосистем с открытыми ключами, они могут принять «осмотрительное» решение без помощи какого-либо посредника. В 1982 г. Эндрю Яо, работавший тогда в Стэнфордском университете, одним из первых исследовал эту проблему.

Недавно Клод Крепо из Парижского университета и его студентка Мария-Елена Скубичевская совместно с двумя из нас (Беннетом и Брассаром) показали, что квантовая аппаратура наподобие той, которая уже создана для передачи ключей, может быть использована для совместного принятия «осмотрительных» решений без посредников и без каких-либо математически не доказанных допущений. Принятия «осторожного» решения можно достичь за счет многократного применения специальной процедуры обработки информации, называемой передачей забывчивости. Эта процедура фактически является вариантом метода Визнера пересылки двух сообщений таким образом, что получатель может прочесть любое из них, но не оба вместе. В 1981 г. Мишель Рабин из Гарвардского университета формализовал задачу о переносе забывчивости, не зная о первой, но неопубликованной работе Уайзнера, которая была выполнена за десять лет до этого. Позднее Крепо, Джо Килиан, работавшие тогда в Массачусетском технологическом институте, и другие исследователи показали, что передача забывчивости

может быть применена для осмотрительного принятия решений.

Одно из достоинств квантового метода принятия осмотрительных решений заключается в том, что в отличие от пересылки ключа этот метод применим на практике даже на коротких расстояниях. К сожалению, известные реализации этого метода довольно неэффективны с математиче-

ской точки зрения, поскольку в них даже для принятия простейших решений требуется переслать много тысяч фотонов. Если удастся существенно повысить математическую эффективность этих методов, то принятие осмотрительных решений может стать одним из важнейших применений квантовой криптографии.

Наука и общество

Новые перспективные технологии хранения данных

ПОДОБНО обитателям городских квартир, пытающихся запереть накопившееся за всю жизнь барахло в крошечную кладовку, специалисты по вычислительной технике постоянно думают о том, как бы разместить все большее количество данных во все меньшем пространстве. Прошедшим летом исследователи из компании AT&T Bell Laboratories и Алмаленовского научно-исследовательского центра фирмы IBM доказали, что они не менее изобретательны, чем жители Нью-Йорка, когда им удалось упаковать значительно большее количество информации на той же самой поверхности магнитного диска.

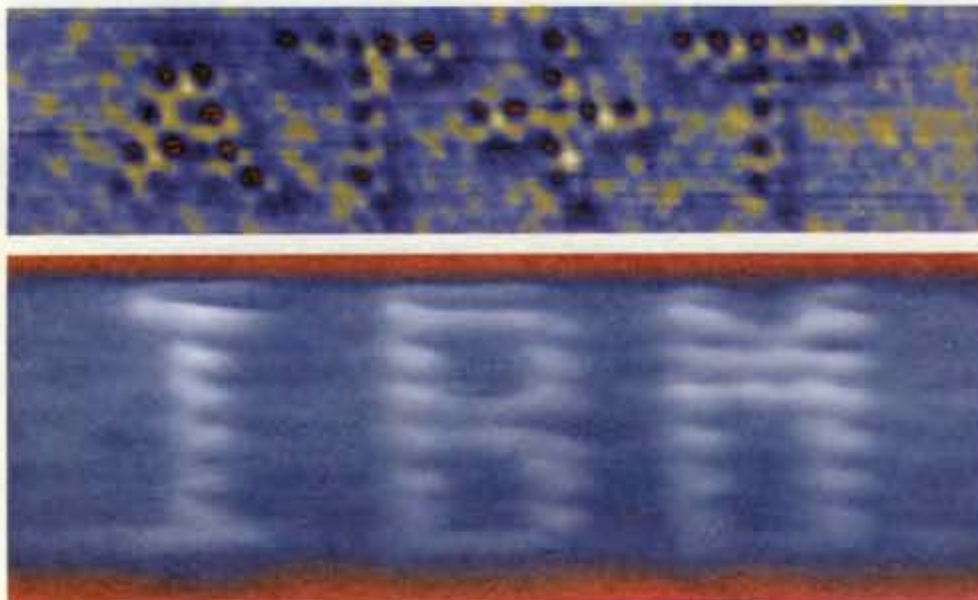
В июле группа специалистов из Bell Laboratories в Мюррей-Хилле (шт. Нью-Джерси) опубликовала статью, в которой говорилось, каким образом ей удалось разместить на магнитооптическом диске примерно в 100 раз большее количество данных — 45 Гбит (миллиардов бит) на квадратном дюйме, — чем обычно помещается на нем. (Это все равно, что поместить пару копий «Войны и мира» на площади размером с булавочную головку, говорят в AT&T.) В конце августа исследователи компании IBM, работающие в Сан-Хосе (шт. Калифорния) должны были опубликовать статью, в которой собирались объяснить, каким образом им удалось упаковать 30 Гбит на одном квадратном дюйме пластикового диска для однократной записи. Авторы разработки утверждают, что их система читает эти данные в 10 раз быстрее по сравнению с системой, построенной их конкурентами с восточного побережья.

Упомянутые работы привлекают внимание как с точки зрения технической новизны, так и с точки зрения коммерческой перспективы. На мировом рынке технология хранения дан-

ных уже оценивается в 40 млрд. долл. Развитие телевидения с высокой четкостью изображения, все более сложных телекоммуникационных систем и компьютерных сетей будет увеличивать потребность в системах хранения данных. Поэтому конкуренция между различными исследовательскими группами (даже в учреждениях, традиционно отличающихся спокойной атмосферой) становится все более жесточечной.

Чтобы записать столь огромное количество данных на такой маленькой поверхности, исследователи из IBM, Bell Laboratories и другие начали применять инструменты, которые чаще использовались для наблюдения микроскопических структур, чем для их создания. Например, ученые из Bell Laboratories основывают свои разработки на устройстве, являющемся потомком классического оптического микроскопа, в то время как группа из IBM обратилась к более современной технологии — атомносиловому микроскопу (atomic force microscope) АСМ. В обоих методах используется так называемый сканирующий датчик, устройство, ставшее популярным в результате успеха сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), принесшего Нобелевскую премию двум исследователям из IBM в 1986 г.

СТМ обычно основан на крошечном датчике, подвешенном на постоянном расстоянии от исследуемой поверхности и позволяющем регистрировать контуры поверхности вплоть до мельчайших выступов размерами с одиночный атом. В устройстве измеряется изменение электрического тока, проходящего между датчиком и исследуемой поверхностью. Несмотря на то что СТМ имеют самую высокую разрешающую способность при наблюдении мельчайших объектов, они инерционны и действуют слишком медленно, чтобы служить инструментом записи данных.



В СТО РАЗ БОЛЬШЕ БИТОВ НА ДЮЙМ могут многократно записывать на магнитооптическом диске исследователи из AT&T, пользуясь сканирующим оптическим микроскопом (вверху). Исследователи из IBM достигли таких же плотностей данных на однократно записываемом пластмассовом диске (внизу). Прежде чем подобные инструменты станут широко доступными, предстоит решить множество технических проблем.

Тем не менее СТМ стимулировали работу ученых, пытающихся повысить возможности технологии, насчитывающей уже несколько веков, — оптического микроскопа. Длина волны видимого света ограничивает разрешающую способность обычных оптических приборов. Однако исследователи уже несколько десятилетий назад поняли, что могут раздвинуть эти пределы, если поместить маленький источник света на расстоянии нескольких долей световой волны от наблюдаемой поверхности. Так родилась новая научная дисциплина — оптическая микроскопия ближнего сканирования.

Чтобы достичь рекордной плотности записи данных, Э. Бетциг и его коллеги из Bell Laboratories Дж. К. Тротмен, Р. Вулф, М. Джорджи и П. Финн воспользовались одновременно тремя новшествами. Во-первых, они усовершенствовали датчик: растягивая тонкое оптическое волокно до разрыва, а затем покрывая стекло металлической пленкой, они создали датчик размером 20 нм, который эффективно фокусировал луч света на маленьком участке поверхности.

Затем исследователи разработали метод, позволяющий поддерживать постоянное расстояние между датчиком и поверхностью мишени и который они назвали чисто силовой микроскопией. Подобно волоску кисточки, датчик поддерживается перпендикулярно поверхности. По мере того как датчик вибрирует, исследователи

измеряют движение потока воздуха между датчиком и поверхностью. В отличие от этого датчик, используемый специалистами IBM в системе атомно-силовой микроскопии, непосредственно касается поверхности диска, подобно игле проигрывателя. (Он делает углубления в поверхности, когда она разогревается лазером.)

Наконец, эта группа воспользовалась магнитооптической пленкой, разработанной в Университете Карнеги — Меллона для магнитных носителей информации высокой плотности. «Пленка не была предназначена для работы, проводившейся в Bell Laboratories, — отмечает Бетциг. — Мы почувствовали, что находимся на верном пути, поскольку в нашем подходе слилось многое из того, что делается сейчас другими исследователями. Это дает нам хорошие предпосылки для коммерческого успеха».

Чтобы прочесть участок на диске, исследователи из Bell Laboratories прикрепляют датчик из оптического волокна на сканирующее устройство, напоминающее головки чтения-записи, применяемые в обычных дисковых системах. С помощью подсветки лазерным лучом низкой интенсивности они могут читать информацию, образуемую точечными неровностями на поверхности диаметром от 60 до 80 нм. Более мощный лазерный луч «записывает» данные, изменяя полярность намагниченных зон. Благодаря измененной полярности эти зоны начинают по-другому отражать свет. Физический механизм такой за-

писи пока еще не до конца понятен, говорит Бетциг. По его собственной версии, лазер разогревает кончик датчика, который в свою очередь изменяет полярность зон намагниченности посредством теплового воздействия на участок поверхности диска. Впоследствии диск можно перезаписывать много раз.

Как считают исследователи из IBM, атомно-силовые микроскопы, с другой стороны, могут читать и записывать данные быстрее, чем их оптические аналоги. В августовском номере журнала «Applied Physics Letters» 1993 г. Д. Ругар и Дж. Мамин должны опубликовать сообщение, согласно которому разогретый кончик АСМ способен читать и записывать данные на пластмассовом диске со скоростью не меньшей 100 кГц. (Один из недостатков метода заключается в том, что данные можно записывать только один раз.) В то же время аппаратура, разработанная в Bell Laboratories, сейчас читает данные со скоростью порядка 10 кГц, что в несколько раз меньше скорости считывания у обычного проигрывателя для компакт-дисков.

«Для нас серьезную проблему представляет скорость считывания, — признает Бетциг, — поскольку она ограничена количеством фотонов, которые можно выжать из датчика-головки, и поэтому ограничена длиной волны лазерного излучения». Поскольку АСМ просто регистрирует углубления в подповерхностном слое, он может с легкостью достигать более высоких скоростей чтения. Тем не менее Бетциг утверждает: «Мы полагаем, что сумеем достичь скорости 10 МГц как для чтения, так и для записи, но как — это пока секрет фирмы».

Чтение и запись — это лишь первые шаги на пути к созданию машин, которые смогут оперировать большими количествами данных. Возникнет много технических проблем, в том числе обнаружение и исправление ошибок, прослеживание за единичными битами в море информации. «Если все пойдет как надо, — рассуждает вслух Бетциг, — то в лучшем случае мы сможем создать коммерческий продукт лет через пять». Команда из IBM более сдержана в прогнозах. «Очевидно, мы заинтересованы в скорейшей разработке в связи с потенциально важными технологическими новшествами», — говорит Ругар, руководитель научно-исследовательской программы по хранению данных. Но он не захотел что-либо сказать о сроках, по истечении которых IBM могла бы попытаться выйти на рынок со своим новым изделием.

Кроме того, существует еще целый ряд технологий, включая различные модификации сканирующих датчиков, которые обещают повысить плотность хранения данных. Так, в Станфордском университете К. Куэйт со своими коллегами применяет комбинированную атомно-силовую и

емкостную микроскопию для упаковки данных на диске. В других лабораториях ученые продолжают исследовать методы трехмерного хранения информации, например, в голографических кристаллах.

Бетциг настроен оптимистично. «Существуют триллиарды способов

хранения данных», — говорит он с энтузиазмом. Теперь инженеры должны продемонстрировать их сравнительные возможности и решить, какие методы окажутся наиболее практичными.

Элизабет Коркоран

Черви-козыри

ОБЩЕСТВЕННОЕ движение и законодательные меры, направленные на ограничение использования химических пестицидов, заставляют фирмы напрягать все усилия в поисках альтернативных продуктов. В этом смысле у компании Biosys в Пало-Альто (шт. Калифорния) уже есть то, что буквально проползает сквозь любые заслоны. Она разводит микроскопических нематод, уничтожающих насекомых под землей, где 30% важнейших сельскохозяйственных вредителей проводит по крайней мере часть своей жизни. Некоторые нематоды сами относятся к опасным паразитам растений, но штамм рода *Steinernema*, выведенный в Biosys, стал питаться исключительно личинками, от которых страдает урожай.

Большинство биологических пестицидов, например бактериальные, неактивны до тех пор, пока насекомые не съедят их, как отмечает главный инженер Biosys В. Сохони. А крошечные червячки, которых фирма начала продавать в этом году, сами ищут свою жертву, ориентируясь на углекислый газ, выделяемый находящимися в почве насекомыми. Проникнув в них сквозь какое-нибудь отверстие тела, нематоды вызывают летальную инфекцию, в чем им помогают симбиотические бактерии, способствующие перевариванию добычи. Насекомое гибнет через день-два, но его останки обеспечивают пищу и местобитанием еще несколько поколений нематод. Когда все съедено, те отправляются на поиск новых жертв. Они расползаются на расстояние до 30—35 см, не причиняя вреда земляным червям, кутикула которых для них непроницаема. «Если нет вредителей, то исчезнут и нематоды», — поясняет Сохони.

О таких полезных червях и бактериях, которых они содержат, известно уже лет 50, но до фирмы Biosys еще

никому не удавалось разрешить проблему их широкомасштабного разведения, необходимого для коммерческого производства нового биологического пестицида. Его разработка «потребовала взглянуть на мир с точки зрения нематоды», по словам М. Фридмана, вице-президента фирмы, ответственного за научные исследования. Эти создания гораздо чувствительнее бактерий к температуре и pH, им нужно больше, чем клеточным культурам, кислорода. Поскольку нематоды размножаются половым путем, необходима достаточно спокойная среда, благоприятствующая спариванию самцов с самками. Еще больше осложняет дело то, что они патогенны для насекомых только во время так называемой инфекционной ювенильной стадии своего развития, достигаемой через 16—18 дней жизни.

Когда фирма Biosys начинала эту работу, первым делом пришлось подумать, чем нематод кормить. Остановились на чем-то вроде теста для пирога: эмульсия, содержащая сырые яичные желтки, соевую муку и лецитин, обеспечивает их необходимыми жирами и белками. Густую смесь можно взбалтывать во всем объеме ферментера. При этом она насыщается кислородом, не становясь слишком турбулентной в непосредственной близости от червячков. Того количества инфекционных нематод, которое получается в ферментере объемом 75 тыс. л, достаточно для обработки 2023,6 га посевной площади при дозе 40 штук на 1 см².

В настоящее время распространение и хранение живых дышащих нематод осуществляются путем их иммобилизации в геле с консистенцией застывшего резинового клея. Препятствуя движению, он снижает потребность животного в кислороде, и продукт в результате дольше сохраняет свежесть. К следующему сельскохозяйственному сезону Biosys надеется разработать более подходящий мягкий «упаковочный» материал. Используется также анализ ДНК для селекции штаммов с повышенной устойчивостью к ультрафиолету.

По прогнозам многих финансовых экспертов, еще через пять лет фирма Biosys, основанная в 1983 г. с первоначальным капиталом, внесенным пионерами освоения «Силиконовой долины» У. Хьюлеттом и Д. Пакардом, захватит значительную часть мирового рынка средств борьбы с почвенными вредителями, оцениваемого в 2 млрд. долл. Сейчас она пытается податься к таким потенциальным потребителям, как цитрусовые и клубничные фермы. Тем временем фирма Ortho уже продает препарат нематод для использования в садах и на газонах, а Ciba-Geigy — для производителей торфа и декоративных растений.

Технологию Biosys начинает осваивать третья крупная компания — Archer Daniels Midland, известная переработкой кукурузы; она заключила контракт на получение нематод в своей новой установке по 1996 г. включительно. «Возможно, скоро мы потеряем самостоятельность», — намекает Сохони. Если нематоды, оправдав ожидания, составят серьезную конкуренцию традиционным пестицидам, весьма вероятно, что какой-нибудь гигантской корпорации его фирма покажется таким же лакомым кусочком, как червячкам — вредные личинки.

Дебора Эриксон



БЕНКАТ С. СОХОНИ из фирмы Biosys смотрит в биореактор, полный нематод. (Фотография: Douglas L. Peck.)

Горная болезнь

Разнообразные, но коварные проявления этой нередко смертельной болезни укрощают многих покорителей вершин. Однако зачастую опасность можно предотвратить

ЧАРЛЗ С. ХЬЮСТОН

В КАНУН нового 1960 г. мне позвонил молодой человек, который был вынужден оставить высоко в горах под Аспеном (шт. Колорадо) своего больного товарища, чтобы спуститься на лыжах за помощью. Была собрана спасательная партия, и вечером следующего дня пациента доставили для лечения в больницу; по описанию звонившего мне человека я предположил, что буду иметь дело с пневмонией. Однако вместо воспалительного процесса, характерного для пневмонии, у молодого мужчины обнаружилось скопление жидкости в обоих легких.

Такое открытие было весьма необычным, поэтому один известный кардиолог убедил меня опубликовать мои наблюдения. В ответ на короткую статью в журнале «New England Journal of Medicine» мне пришли сотни писем с описаниями аналогичных заболеваний, которые ранее диагностировались как пневмония. Открытие того, что, по-видимому, было новым видом горной болезни — позже заболевание было названо высокогорным отеком легких, — оживило мой давний интерес к альпинизму и связанным с ним медицинским проблемам. В 1936 г. я в качестве врача сопровождал группу, совершавшую восхождение в Гималаях, и впервые наблюдал, но не смог диагностировать случай горной болезни.

Высокогорный отек легких и другие симптомы заболевания, обусловленного высокогорьем, представляют собой с медицинской точки зрения крайне сложную проблему. Сейчас в горы стремится огромное количество людей — их привлекают альпинизм, горные лыжи, туризм или просто отдых в горах. В последние годы горные восхождения стали еще более популярными благодаря возможностям современного транспорта и появлению хорошего снаряжения. Одним из свидетельств этого может служить следующий факт: с 1903 по 1912 г. лишь 42 горновосходителя пытались покорить пик Мак-Кинли (6193 м) на Аляске. Никто из них не добился успеха. В период с 1988 по 1990 г. восхождение совершили 2923 человека —

1659 удалось достигнуть вершины. Соответственно возросло и число жертв недугов, связанных с пребыванием в горах, и в частности — высокогорного отека легких. 14% всех смертельных случаев на Мак-Кинли обусловлено горной болезнью.

Причиной горной болезни является в первую очередь кислородная недостаточность, или гипоксия. По мере подъема над уровнем моря атмосферное давление падает, соответственно уменьшается и концентрация кислорода, поскольку его процентное содержание в воздухе остается неизменным. Снижение уровня кислорода инициирует в организме ряд физиологических изменений, которые могут привести к смертельному исходу.

Однако продолжительное пребывание на высоте или, наоборот, на уровне моря, но в условиях недостатка кислорода может сопровождаться коррекцией функциональных свойств организма, называемой акклиматизацией. Благодаря процессу акклиматизации люди могут жить при таких концентрациях кислорода, которые в обычной ситуации вызывают серьезные проблемы. Великолепные горные вершины, венчающие Землю, по-прежнему завораживают и притягивают людей — но, чтобы как-то обезопасить себя, необходимо иметь представление о многих тяжелых последствиях гипоксии, разнообразных формах горной болезни и о процессе акклиматизации.

ВЫСОКОГОРНЫЙ отек легких — заболевание отнюдь не новое, хотя его лишь недавно признали одной из форм горной болезни. В 403 г. н. э. китайский архивариус Ху Джао, совершивший переход по Великому шелковому пути, оставил записи о болезни своего спутника: «На теневом северном склоне Малых снежных гор ветер пронизывал до костей. Состояние Ху Джинга было очень тяжелым: изо рта у него шла пена, силы быстро покидали его, он то и дело терял сознание. Наконец, он замертво упал на заснеженную землю».

Через сто пятьдесят лет после этого вождь Моголов Мирза Мухаммад

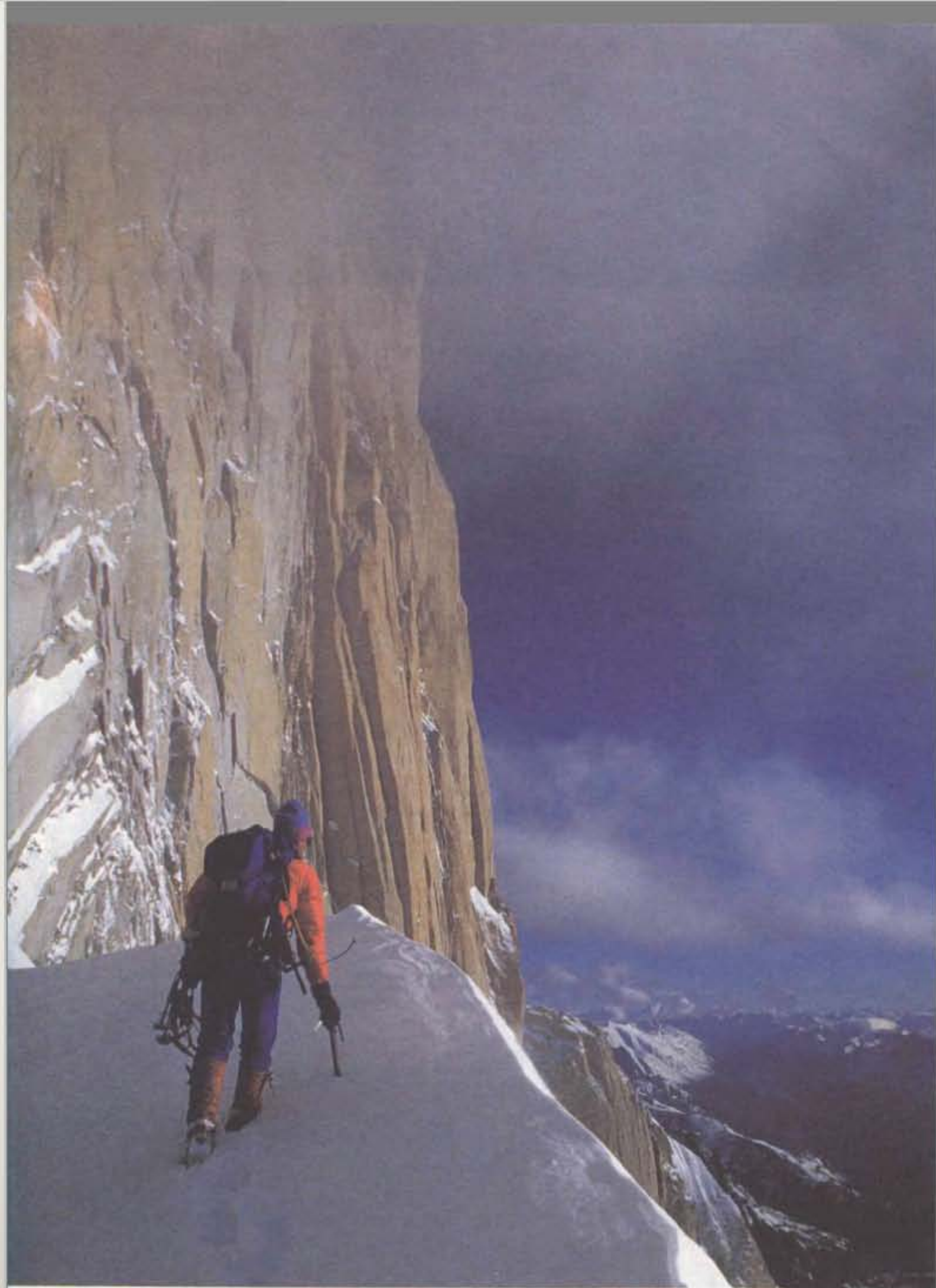
Хайдар описывал, в какое ужасное состояние были повергнуты его войска, участвующие в военном походе по Тибетскому нагорью (от 4000 до 4600 м над уровнем моря). Болезнь проявлялась в разнообразных формах: от некоторой слабости и одышки до галлюцинаций; в самых тяжелых случаях люди впадали в коматозное состояние, часто завершавшееся смертью. В начале XVI в. иезуитский священник Хосе Акоста записал аналогичные наблюдения, сделанные им во время высокогорного перехода в Андах.

Конечно, Ху Джао, Хайдар и Акоста ничего не могли знать о причинах подобной болезни, поскольку природа земной атмосферы оставалась неизвестной до середины XVII в. В это время Гаспар Берти, Эванджелиста Торичелли и Флорин Перье провели ряд экспериментов, которые показали, что атмосфера обладает массой и ее давление падает с высотой.







В XVIII в. люди стали совершать восхождения на горные вершины ради удовольствия, и врачи получили клинические подтверждения того, что понижение атмосферного давления вызывает физиологические изменения в организме человека. В 1786 г. был покорен Монблан, высочайший пик Европы (4807 м над уровнем моря). В следующем десятилетии Горацио-Бенедикт де Соссюр описал воздействие высоты на его сердечную деятельность и дыхание. Вскоре был открыт кислород и установлена его решающая роль в поддержании жизни и протекании окислительных процессов. Однако о связи между гипоксией и горной болезнью еще ничего не было известно.

Золотой век альпинизма начался в 1850-х годах, когда британский врач Альберт Смит прочитал цикл лекций о восхождении на Монблан. Тысячи

АЛЬПИНИСТ совершает восхождение на пик Фицрой (3400 м) в Патагонии. Ограничивая скорость подъема и учитывая необходимость акклиматизации, опытные альпинисты могут частично снизить вероятность возникновения горной болезни.



Важные события в истории покорения горных вершин

<p>Китайцы называют Гималаи «Горами головной боли»</p> 	<p>Эванджелиста Торричелли</p>  <p>Гаспар Берти изобретает барометр; Эванджелиста Торичелли использует его идею</p>	<p>Джозеф Пристли и Антуан Лавуазье описывают кислород и доказывают его необходимость для жизни и горения</p>  <p>Джозеф Пристли</p>	<p>Братья Монгольфье впервые совершают полет на воздушном шаре</p> 	<p>Покорение Монблана (4807 м) в Альпах</p> 	<p>Поль Берт</p>  <p>Поль Берт и Анджело Моссо исследуют эффекты гипоксии на больших высотах</p>
---	--	---	--	---	---

35 до н. э. 1640—1643 1774—1789 1783 1786 1778—1868

и изучения горной болезни

<p>Альпинисты в Гималаях и Андах обращают внимание на акклиматизацию</p>	<p>Научная экспедиция на пик Пайка (Колорадо)</p> 	<p>Операция «Эверест» с использованием декомпрессионной камеры</p> 	<p>Экспедиция «Серебряная хижина» изучает акклиматизацию в Гималаях</p> 
--	---	--	---

1885—1885 1911 1946 1950 1953 1961

людей устремились в горы, и за следующие три десятилетия все вершины Альп были покорены. Несколько смельчаков направились в Гималаи и Анды. Вошли в моду и аэростаты, впервые ставшие управляемыми за сто лет до этого, и отважные путешественники смогли подняться достаточно высоко, чтобы испытать на

себе всевозможные опасности прео-вращения в горах. В популярной и медицинской литературе начал появляться термин «горная болезнь». Во всех сообщениях описывались (и нередко в весьма преувеличенном виде) проявления «горной напасти», поражающей альпинистов и некоторых животных, од-

нако вопрос о причинах заболевания оставался предметом серьезных разногласий. Отсутствие упоминаний о тяжелых последствиях восхождения часто вызывало сомнения в том, что вершина действительно была покорена. В последние десятилетия XIX в. работы двух врачей пролили свет на

связь горной болезни с разреженностью воздуха. Поль Берт проводил исследования, в которых действие высокогорья моделировалось с помощью металлической декомпрессионной камеры. Изучение процесса переноса кислорода гемоглобином позволило показать, что содержание кислорода в крови на высоте значительно ниже, чем на уровне моря. Затем Поль Берт сам провел некоторое время в декомпрессионной камере, условия в которой соответствовали состоянию атмосферы на высоте 6400 м — при этом ученый вдыхал кислород из кожаного мешка. Никаких симптомов болезни не наблюдалось, поэтому он пришел к выводу, что причиной горной болезни является не пониженное давление, а кислородная недостаточность. Анджело Моссо, современник Берта, исследовал состояние людей как в декомпрессионной камере, так и на вершине горного массива Монте-Роза (4638 м) в Италии. Он также пришел к мнению, что гипоксия может повлечь за собой горную болезнь, однако в отличие от Берта он считал, что более важным фактором является вызываемая усиленным дыханием недостаточность углекислого газа.

тельно поэтому, что гипоксия сказывается на психике, поражая в первую очередь центры высшей нервной деятельности коры головного мозга. По сути, влияние гипоксии на организм человека напоминает эффект воздействия алкоголя. Самый известный симптом горной болезни — это головная боль, однако причины ее остаются неясными. В основу одного из объяснений может быть положена восприимчивость особой чувствительной мембраны, называемой *pia mater*, — сосудистой мозговой оболочки, покрывающей мозг и кровеносные сосуды. По мере падения уровня артериального кислорода приток крови к мозгу увеличивается. В результате расширившиеся сосуды или набухшие мозговые ткани могут давить на окружающие их мембраны, вызывая головную боль. В то же время нехватка кислорода приводит к усилению дыхания (гипервентиляции), вследствие чего углекислый газ выкачивается из легких и крови. Снижение содержания двуокиси углерода приводит в свою очередь к снижению притока крови к мозгу.

являются ли потери веса результатом малабсорбции (синдрома пониженного всасывания) или просто следствием более низкокалорийного питания. Итак, эффекты гипоксии очень разнообразны. Наличие определенных симптомов горной болезни определяется высотой, скоростью подъема и другими факторами. Временами совсем, казалось бы, не опасное, хотя и малоприятное недомогание может резко перейти в серьезный недуг, угрожающий жизни. Нередко бывает так, что человек, приехавший на горный курорт, сначала испытывает головную боль и общее ощущение дискомфорта, затем у него быстро развиваются одышка и кашель. Эти симптомы могут привести к коме или галлюцинациям, а при отсутствии соответствующего лечения — к смерти.


ХОТЯ все вышеуказанные симптомы непрерывно переходят один в другой, для удобства я представляю их в виде отдельных категорий. Наиболее распространенная форма заболевания называется острой горной болезнью; она поражает четвертую часть всех посетителей горных курортов.

Ее признаки уже перечислены выше: обычно это головная боль, тошнота, рвота, апорексия (отсутствие аппетита) и вялость. Острая горная болезнь может стать достаточно серьезной проблемой, хотя она редко заканчивается смертельным исходом.

Недуг, поразивший моего пациента в Аспене, — высокогорный отек легких — встречается не так часто, как острая горная болезнь, но он значительно более опасен. Исследования показали, что даже на умеренных высотах порядка 2500 м у большинства людей в ткани, отделяющей альвеолы, или воздушные мешки, от кровеносных капилляров, скапливается некоторое количество жидкости. Обычно эта жидкость быстро всасывается.

Однако в случае, когда жидкость скапливается внутри альвеол, перенос кислорода из легких в кровь затрудняется. Это способствует нарастанию

Некоторые физиологические последствия гипоксии



УРОВЕНЬ МОРЯ ВЫСОТА

На высоте увеличивается приток крови к мозгу, что приводит к скоплению жидкости. Возрастное давление может вызывать головную боль и ухудшать умственную деятельность.

Снижение уровня двуокиси углерода в результате гипервентиляции приводит к повышению щелочности крови. Почки начинают выделять бикарбонат, что нормализует pH крови.

На больших высотах гормон эритропоэтин стимулирует образование эритроцитов. Однако избыточное количество эритроцитов может ухудшить приток кислорода к тканям и привести к свертыванию крови.

УРОВЕНЬ МОРЯ 4600—5200 м

На высотах свыше 4600 м над уровнем моря вены и артерии сетчатки могут увеличиться вдвое; возможно появление мелких кровоизлияний.

АЛЬВЕОЛА

Вследствие гипоксии в мембранах альвеол легких скапливается жидкость. Жидкость постепенно просачивается внутрь альвеол, что препятствует проникновению кислорода в кровь — в результате человек не может дышать.

ЖИДКОСТЬ

УРОВЕНЬ МОРЯ ВЫСОТА

Повреждение натриевого (Na) насоса на высоте приводит к тому, что клетки теряют большое количество калия (K); в результате нарушается водный баланс и развивается отек.

Полеты на самолетах и растущий интерес к спортивному альпинизму и горному туризму расширили представление людей о гипоксии. Исследования показали, что имеется целый ряд различных форм горной болезни, одна из которых достаточно неприятна, но не вызывает особых опасений, другие значительно более серьезны и чреваты смертельным исходом. Проявление болезни зависит от того, какие части организма более всего восприимчивы к влиянию высокогорья.

В высшей степени уязвимым органом является мозг. В среднем от 10 до 15% всего объема крови проходит через мозг; при этом мозг использует 15—20% потребляемого организмом кислорода. Наиболее «требовательная» область — это кора головного мозга, в которой протекают сложнейшие психические процессы. Неудиви-

вающий эффект — усиление или ослабление притока крови к мозгу — определяется как уровнем динамического равновесия между гипоксией и гипокапнией (недостаточностью двуокиси углерода), так и чувствительностью рецепторов, влияющих на кровоток. Такая чувствительность весьма сильно варьирует у разных людей; отсюда ясно, почему интенсивность головной боли весьма существенно различается и почему результаты исследований мозгового кровотока оказываются весьма противоречивыми. Тошнота, рвота, нарушение сна — все эти столь типичные для горной болезни явления могут быть следствием изменения притока крови к среднему мозгу, в котором находятся центры, контролирующие соответствующие процессы.

Высота не влияет на слух, обоняние или восприятие вкуса, но аппетит обычно снижается, что временами приводит к потере веса. Непонятно,

Высотные характеристики горной болезни



кислородной недостаточности и дальнейшему просачиванию жидкости в воздушные мешки. Жертва буквально тонет в своих собственных соках. Типичные симптомы такой формы болезни — нарастающая одышка и мучительный кашель с выделением пенистой, кровянистой мокроты.

Еще более серьезное заболевание — церебральный отек. При этой форме болезни, проявляющейся уже на высоте порядка 2700 м, поражается центральная нервная система: отдельные области мозга «затапливаются» жидкостью. К ранним признакам заболевания относятся атаксия (расстройство координации движений), проявляющаяся в нетвердой, «пьяной» походке или в затруднениях при выполнении работ, требующих тонких двигательных реакций. Такие изменения обусловлены отеком мозжечка — отдела мозга, ответственного за координацию движений. Часто возникают также галлюцинации и спутанность сознания. При отсутствии лечения отек мозга может привести к смерти.

На другом краю спектра физиологических эффектов находится хроническая горная болезнь — малорас-

пространное заболевание, которое встречается у небольшого числа людей, постоянно живущих на высоте более 3500 м. Больные испытывают усталость, учащенное сердцебиение, боли в груди, у них опухают голеностопные суставы, в венах и легких отмечается избыточное количество эритроцитов и кровяных сгустков. Спуск на меньшие высоты снимает неприятные симптомы этого часто смертельного недуга.

На высотах, превышающих 3000 м, органическим изменениям могут подвергаться и глаза. Поскольку палочки — чувствительные рецепторы сетчатки — уже не получают необходимого им большого количества кислорода, острота зрения в темноте снижается на 50%. На высоте более 4300 м у людей на задних стенках глаз появляются точечные кровоизлияния, которые остаются незамеченными. Исследователи пока не могут определить, каково значение этих кровоизлияний: следует ли считать их диагностическими признаками или они важны лишь для прогноза дальнейшего развития заболевания. Существует малопривлекательное для альпинистов мнение, что подобные симптомы говорят о

наличии кровоизлияний где-то в других местах организма. Исследователи, настаивающие на том, что продолжительная или многократно повторяющаяся гипоксия может привести к необратимым повреждениям мозга, считают причиной этого кровоизлияния в мозговой ткани.

Реакция на гипоксию выражается в сложнейших, часто как будто бы несовместимых изменениях, происходящих в организме. Глубина и частота дыхания возрастают, что способствует проникновению в легкие больших объемов воздуха. В результате повышается давление кислорода в альвеолах и снижается содержание углекислого газа в крови. Однако такая реакция создает критическую ситуацию. Гипервентиляция может и должна ослабить гипоксию. Но в организме должен еще поддерживаться постоянный уровень pH. Поскольку такое равновесие достигается путем сохранения определенной концентрации углекислоты, гипервентиляция грозит нарушением гомеостаза.

Оказавшись перед такой дилеммой, организм идет на компромисс: вентиляция усиливается до такого уровня, который позволяет увеличить количество кислорода в альвеолах; при этом алкалоз, вызываемый сокращением содержания в крови двуокиси углерода, компенсируется интенсивным выведением бикарбоната. Степень удовлетворения двух этих противоречивых условий определяется как эффективность процесса акклиматизации, так и возможность человека устоять перед горной болезнью.

Двойная регуляция служит причиной очень интересного феномена: контроль хаотически перемещается между центрами среднего мозга, ответственными за уровень углекислого газа и pH крови, и расположенным в области шеи каротидным (сонным) гломусом — небольшим скоплением клеток, чувствительных к кислороду. В результате дыхание приобретает неравномерный характер; такой синдром, имеющий название дыхания Чейна—Стокса, или периодического дыхания, часто встречается на высоте свыше 2700 м и совершенно неизбежен на больших высотах. Обычно за периодом быстрого, постепенного углубляющегося дыхания следует переход к поверхностному дыханию, после чего оно полностью останавливается на достаточно опасный промежуток времени (от восьми до десяти секунд), затем весь цикл повторяется вновь. Периодическое дыхание резко выражено во время сна, поэтому, когда человек спит, среднее содержание кислорода в его организме падает.

Другой ранней реакцией на гипок-

сию является повышение частоты сердечных сокращений и объема сердечного выброса. Это приводит к тому, что кровь, циркулирующая в организме, сильнее насыщается кислородом. Кроме того, в течение некоторого времени происходит усиленный отток жидкости из крови в ткани, вследствие чего концентрация гемоглобина увеличивается, и сердце получает возможность при каждом ударе высвобождать большие количества кислорода. Объем сердечного выброса спадает до нормального уровня примерно за неделю, тогда как гипервентиляция сохраняется в течение чуть ли не всего периода пребывания на высоте.

Образование эритроцитов стимулируется быстрым повышением уровня эритропоэтина — гормона, воздействующего на костный мозг. Первичные или вторичные изменения происходят во многих других гормональных системах, а также в функционировании симпатической нервной системы. Практически не остается сомнений в том, что гипоксия вызывает нарушения электролитического и водного баланса. Это приводит к сужению кровеносных сосудов и задержке воды в организме; кроме того, меняется проницаемость клеточных мембран и ухудшается работа почек.

УЖЕ известны многие из процессов, происходящих в организме тогда, когда он реагирует на снижение концентрации кислорода, однако горная болезнь все еще хранит свои тайны, особенно в том, что касается клеточных механизмов процессов реакции на гипоксию. Необходимо получить исчерпывающее представление о патофизиологической картине гипоксии.

В одной из теорий предполагается, что гипоксия вызывает обратимые нарушения в работе энергетически активного ионного «насоса», называемого натриевым насосом. Этот насос позволяет поддерживать нормальные уровни натрия и калия внутри каждой клетки. Натриевый насос потребляет 20% всего поглощаемого организмом кислорода, поэтому неудивительно, что при нехватке кислорода в его работе могут происходить разного рода сбои.

В соответствии с данной теорией при сбоях в работе насоса натрий накапливается в клетках, а калий выходит из них; естественным результатом этого является нарушение водного баланса и развитие отека. От гипоксии прежде всего страдают те клетки, в которых насос подвергается наиболее серьезным повреждениям. Характер клеточных аномалий в свою

очередь определяет развитие той или иной формы горной болезни. Недавние проведенные исследования свидетельствуют о том, что под влиянием гипоксии перестраиваются и кальциевые каналы; возможно, свой вклад в развитие горной болезни вносят еще какие-то клеточные насосы.

По непонятным пока причинам гипоксия, видимо, приводит к увеличению сократимости небольших артериол, в результате чего повышается давление в легочных артериях. Вызванное этим расширение сосудов влечет за собой растяжение их эндотелиальной выстилки и таким образом способствует высвобождению биологически активных веществ, называемых кининами. Некоторые из кининов повышают проницаемость сосудов и усиливают агрегацию, или агрегацию, тромбоцитов, тогда как другие вызывают прямо противоположные эффекты. Вероятность развития отека легких у конкретного человека определяется интенсивностью ответной реакции его организма.

Повышение давления в легочных артериях считается также причиной растяжения и даже разрывов плотных соединений между эндотелиальными клетками. Расхождение клеток эндотелия совместно с действием кининов способствует выходу плазмы и эритроцитов в интерстициальное пространство и полость альвеол. Такая последовательность событий позволяет понять, почему высокогорный отек легких столь резко отличается от отеков, вызываемых токсическими веществами, сердечной недостаточностью или ранениями, — во всех этих случаях повреждаются мембраны капилляров и альвеол, но давление в легочных артериях не увеличивается.

В то время как клеточные изменения, сопровождающие развитие высокогорного отека легких, кажутся достаточно понятными, механизмы возникновения отека мозга пока еще не ясны. На сканограммах мозга больных видно наличие как местных, так и генерализованных отеков. Однако этих фактов явно недостаточно, чтобы понять связь между симптомами заболевания и картиной лежащих в его основе патологических процессов. На вскрытиях обнаруживается наличие генерализованного отека, небольших рассеянных кровоизлияний и крупных кровяных сгустков.

У жителей высокогорья с приобретенной горной болезнью гипоксия проявляется в большей степени, поскольку у них слабо выражена дыхательная реакция организма на кислородную недостаточность. Кроме того, по каким-то причинам у горцев

увеличивается длительность действия эритропоэтина, вызывающего усиленную пролиферацию эритроцитов. Оба этих фактора — чрезмерная гипоксия и наличие большого количества эритроцитов — повышают вязкость крови и могут привести к застою явлениям в характере сердечной деятельности.

Но если высокогорье так серьезно влияет на здоровье жителей равнины, как же некоторые альпинисты могут подниматься на высоты порядка 6000 м и оставаться там некоторое время, не говоря уже о покорении Эвереста (8848 м), где атмосферное давление составляет менее одной трети давления на уровне моря? Как обитатели Тибета могут постоянно жить на высочайшем нагорье Азии, а индейцы племени Квечуас — в высокогорных Андах? Объяснение состоит в акклиматизации: согласованные функциональные изменения в организме позволяют запасать в тканях избыточные количества кислорода.

Изучение механизмов процесса акклиматизации у жителей гор или альпинистов представляет собой сложную задачу. На результаты исследований могут повлиять множество факторов, включая холод, физическое напряжение, неподходящую пищу и воду, а также суровые условия жизни. Наилучшим способом изучения эффектов гипоксии являются эксперименты с использованием декомпрессионной камеры. (Однако и эта методика не лишена своих минусов: чистота эксперимента снижается из-за однообразия, ограничения пространства и гиподинамии.)

В 1946 г. я вместе с Р. Рили, работавшим тогда в госпитале Бельвью, провел исследование под названием «Операция Эверест». В этом эксперименте четыре человека провели 35 дней в небольшой стальной камере, давление в которой постепенно откачивалось до величины, характерной для Эвереста. Мы смогли доказать, что человек способен жить и даже совершать несложную работу после десяти дней пребывания в условиях, моделирующих высоту 7600 м. (Эксперимент был проведен за семь лет до подъема на Эверест с использованием кислородных резервуаров и за 32 года до первого восхождения на Эверест без дополнительного кислородного обеспечения.)

В 1985 г. группа ученых повторила этот эксперимент в исследованиях, названных «Операция Эверест II». Восемь человек провели в камере 40 дней, а шестеро повторно «поднимались на вершину» через 10 дней проживания в условиях, соответствующих высотам от 7300 до 7600 м. Эти

и многие другие исследования позволили более ясно, хотя и не до конца понять, что же представляет собой акклиматизация к условиям высокогорья. Многие из нас уверены, что уроки, преподнесенные высокогорьем, могут иметь огромное значение для диагностики и лечения в обычных условиях пациентов, у которых гипоксия является просто следствием каких-либо болезней или поврежденной.

Как я уже говорил, первая реакция организма на условия высокогорья состоит в том, что все его силы направляются на снабжение клеток достаточным количеством кислорода. Такой немедленный отклик — усиление дыхания и увеличение частоты сердечных сокращений — обеспечивает экстренную защиту организма, пока в нем протекают другие, более длительные изменения. Гипервентиляция сохраняется весьма долго, представляя собой наиболее мощную защитную реакцию. Кроме того, происходит дополнительное образование гемоглобина и возрастает число эритроцитов. В нормальных условиях от 20 до 30% капилляров бездействуют; на высоте же часть этих мелких кровеносных сосудов активизируется, способствуя более эффективному подведению крови к тканям. Ферментативные изменения внутри клеток интенсифицируют анаэробные процессы.

Несмотря на то что организм может частично компенсировать кислородную недостаточность, многие его функции все же нарушаются. Исследователи показали, что каждый раз при увеличении высоты на 300 м максимальная работоспособность снижается на 3%. Длительное пребывание на высоте не может привести к полному восстановлению работоспособности до ее обычного «равнинного» уровня.

У ЛЮДЕЙ, родословная которых насчитывает многие поколения жителей гор, наблюдаются устойчивые физиологические изменения, имеющие, возможно, генетическую природу. У некоторых коренных горцев грудь имеет бочкообразную форму, а легкие увеличены в размере; у других отмечается существенное повышение уровня гемоглобина. У некоторых народностей (например, у индейцев Квиучес, населяющих Чили) обнаруживаются изменения, касающиеся митохондрий (миниатюрных энергетических станций клетки) — они могут быть крупнее или иначе расположены в клетке, их может быть больше.

Люди населяют горы в течение многих веков, однако еще никому не удалось адаптироваться к высоко-

горью настолько, чтобы постоянно жить на высотах более 5200 м. Обитатели равнин могут провести на таких высотах лишь несколько месяцев, после чего состояние их начинает ухудшаться, несмотря на эффекты акклиматизации. По истечении некоторого времени у людей вновь начинает снижаться вес, ухудшаются умственные способности и нарушаются все жизненные функции.

Эксперименты на животных дают лишь намеки на решение загадки многообразия возможных путей переноса и использования кислорода. Например, у тюленей и китов, проводящих много времени под водой, селезенка имеет очень большой размер, выполняя роль резервуара, из которого они черпают кровь, насыщенную кислородом. Эти животные, как и люди, приспособляются к гипоксии главным образом за счет отвода кровотока к более важным органам; при этом у них полностью утрачиваются некоторые функции, чего не бывает у людей. Другие животные, такие, как яки и ламы, используют модифицированные молекулы гемоглобина, что позволяет им захватывать и удерживать больше кислорода.

Для людей лучшим способом достижения акклиматизации является медленный подъем. Как говорится, «тише едешь — дальше будешь». После высоты 2000 м лучше всего подниматься не более чем на 600 м в день, при этом скорость подъема должна соответствовать возможностям самого слабого участника восхождения. Если появляются явные симптомы заболевания, устройте день отдыха или даже спуститесь для ночевки на две-три сотни метров. Высота, на которой устраиваются на ночевки, является более важным фактором, чем высота дневного подъема. Необходимо пить больше жидкости, чтобы компенсировать потери влаги, вызванные усиленным дыханием. Полезно избегать повышенных физических нагрузок в первую пару дней пребывания на высоте. Потребление большего по сравнению с обычным количества соли обычно приводит к задержке воды в организме — этого может оказаться достаточно для инициации горной болезни.

Тем, кто хочет быстро прийти в норму, можно порекомендовать прием некоторых лекарственных препаратов. Ацетазоламид подавляет секреторную деятельность фермента под названием угольная ангидраза (карбоангидраза), что дает возможность избежать избыточных потерь углекислого газа при более глубоком и частом дыхании. Кроме того, этот препарат ингибирует действие антидиуретических гормонов. Дексамета-

зон, глюкокортикоид, может быть иногда полезен тем, что вызывает состояние эйфории, хотя его применение может сопровождаться серьезными побочными эффектами, вплоть до возникновения психозов. Нифедипин, блокатор кальциевых каналов и общий сосудорасширяющий агент, снижает давление в легочных артериях. Одна из форм нифедипина, обладающая эффектом длительного действия, может помочь альпинистам, у которых есть вероятность заболевания высокогорным отеком легких. Относительно лечения общих случаев следует отметить, что более легкие формы заболевания обычно проходят сами через несколько дней. При подозрении на более серьезную болезнь — отек мозга или легких — наилучшим и практически обязательным средством является немедленный спуск. При этом уменьшение высоты всего на две-три сотни метров быстро приносит облегчение. Если этого не происходит, следует задуматься, нет ли каких-то других заболеваний. Полезно вдыхать чистый кислород — правда, обычно альпинисты берут с собой в горы достаточно ограниченный объем чистого кислорода; кроме того, при серьезных отеках дыхание чистым кислородом ни в коем случае не должно быть альтернативой спуску — иначе говоря, спуск вниз — это всегда наилучший вариант. Если по каким-либо причинам спуск невозможен, следует применять сильные диуретические препараты или морфий. В последнее время используется новый многообещающий метод: пациента помещают в специальный мешок, в который накачивают воздух до тех пор, пока в нем не установится давление, соответствующее более низким высотам.

Относительно недавно полученные данные по высокогорному отеку легких говорят о том, что нам еще много надо узнать о горной болезни. Более глубокое проникновение в сущность предмета делает пребывание в горах значительно приятнее и безопаснее, если только люди, отправляющиеся в горы, будут следовать весьма простым правилам. Дальнейшее изучение гипоксии принесет результаты, которые вполне уместно применить и к лечению заболеваний, не связанных с высокогорьем, таких, например, как эмфизема, астма и пневмония.

Однако уже известно, что с течением времени акклиматизация неотвратимо сменяется неуклонным ухудшением состояния. Очевидно, что определенные физиологические пределы все-таки существуют. Наверное, это правильно, что высочайшие горные вершины хранят свое одиночество, постоянно бросая нам вызов.

«Сообразительный автомобиль»

«ВЕЗИ меня домой!» Именно эти слова, как надеется Рей Редди, он сможет вскоре сказать своему автомобилю. Этот исследователь в области робототехники из Университета Карнеги—Меллона захвачен идеей создания автомобиля, который позволял бы водителю садиться за руль пьяным или полусонным и тем не менее все-таки добираться до дому.

Редди — это не просто еще один фанатик-изобретатель новых автомобилей. Автофургоны без водителей уже ездят по улицам и автомагистралям Питтсбурга. (За рулевым колесом сидит все же «аварийный водитель» — на случай отказа автоматической системы вождения.) Опытные образцы таких систем из Навигационной лаборатории университета могут осуществлять вождение со скоростью до 90 км/ч — они запрограммированы на непревышение этого предела. Некоторые из них даже могут припарковать автомобиль у тротуара при наличии свободного места для стоянки. В Мюнхене «мерседес», управляемый компьютером, достиг скорости 100 км/ч при езде по наименее загруженному автобану.

Такие эксплуатационные качества означают весьма большую «отрыв» от того состояния, в котором находились «автономные» автомобили на начальной стадии своего развития. В середине 80-х годов их наивысшая скорость не превышала 3/4 км/ч, и роботизированный автомобиль с такой же вероятностью мог наехать на дерево, как и поехать по асфальтобетонной полосе (поскольку, в конечном счете, и то и другое представляют собой темный объект с приблизительно параллельными сторонами, сужающимися по направлению к верхней части поля зрения робота).

По словам Чарльза Торпа, возглавляющего проект, осуществляемый в Навигационной лаборатории, упомянутые успехи стали возможны частично благодаря усовершенствованиям аппаратных средств вычислительной техники. Вычислительные мощности, стоившие в 1985 г. 750 тыс. долл., можно приобрести сегодня менее чем за одну сотую этой суммы. Однако более важным является тот факт, что исследователи научились определять, какая именно информация необходима для их программы и без ущерба для себя отбрасывать все остальное.

Наука и общество

Например, модуль слежения за дорогой в автомобиле, разработанном в Университете Карнеги—Меллона, состоит из нейронной сети, определяющей, куда надо направлять автомобиль — вправо или влево, — посредством обработки низкоконтрастного видеозображения дороги. Более ранние версии этой схемы, вспоминает Торп, содержали 100 «скрытых элементов» — т. е. узлов, которые суммировали информацию, поступающую от многочисленных входных источников, и выполняли основной объем обработки. Обучение сети происходило с применением небольшого суперкомпьютера.

Сегодняшняя сеть содержит четыре «скрытых элемента» и к тому же выполняет свои функции в виртуальном режиме. Кроме того, она работает достаточно быстро для того, чтобы быть в состоянии обучаться по мере продвижения автомобиля по той или иной дороге. Однако сеть пока еще требует автономного обучения, чтобы научиться правильно выбирать необходимые действия в таких ситуациях, в которых реальный водитель не захотел бы добровольно оказаться (например, при положении автомобиля почти за кромкой дороги или же посередине дороги, но под острым углом к ней).

Есть и еще несколько серьезных помех. Хотя модуль слежения за дорогой работает вполне хорошо при скорости 90 км/ч, лазерный дальномер блока предупреждения столкновений имеет жестко ограниченный диапазон действия. Если автофургон без водителя обгоняет другой автомобиль при относительной скорости более 8 км/ч; он не сможет затормозить достаточно быстро, чтобы избежать столкновения. Поэтому роботизированный автофургон всегда едет по левой полосе движения, поскольку предполагается, что остальной транспорт на этой полосе будет двигаться быстрее него.

Помимо этого, если рассматриваемое устройство и может успешно «переправляться» с одного места на другое, оно совсем необязательно сумеет сделать что-либо сверх этого, когда доберется до пункта назначения, поясняет Дейвид Миллер из Массачусетского технологического института. Когда, например, исследователи из Университета Карнеги—Меллона испытывали свою модель на пригородном маршруте по доставке почты, они даже не рассматривали техническую задачу по открытию крышки почтового ящика и вкладыванию туда

какой-либо корреспонденции или газет. Питер Бонассо со своими коллегами на фирме MITRE в Маклине (шт. Виргиния) построил передвижной робот, который должен был находить и приносить различные предметы. Возможности этого робота были ограничены аналогичным образом: он должен был прибегать к помощи человека или другого робота, вручая им предметы сразу же как только они оказывались найденными.

Миллер утверждает, что «Рокки III», опытный образец марсианского робота, который он и его коллеги разработали в Лаборатории реактивного движения в Пасадене (шт. Калифорния), представляет собой последнее достижение в этой области техники, сочетая в себе функции перемещения в нужном направлении с функциями манипулирования. Он находит путь к определенному участку местности, зачерпывает горсть песка с поверхности грунта и относит эту «пробу земли» к исходной точке своего «путешествия».

Миллер полагает, что исследователи должны сконцентрировать свое внимание на специфических проблемах, которые люди хотят видеть решенными. «Программируемое управление перемещением по траектории вполне могло бы стать одной из таких задач», — сказал он, отметив, что на рынке уже появились первые варианты систем предупреждения столкновений. «Существующая на сегодняшний день система навигации и управления не обеспечивает полностью управление движением», — говорит он.

Торп предпочитает задачи, направленные на уменьшение «риска ответственности». Он предсказывает, что модели, разработанные в Навигационной лаборатории, будут в большей степени подходить для работ, на которых нежелательно использование людей, таких, например, как картирование мест захоронения опасных отходов. Данная задача требует мобильности при перемещении по местности, имеющей неровный ландшафт, однако эту процедуру можно проделывать медленно, и «если вы платите за один только датчик сотни тысяч долларов, то робот уж тем более может стоить дорого». Тем не менее, утверждает он, если бы люди захотели принять роботов «на равных», то механические шоферы могли бы совершать регулярные рейсы уже к концу текущего десятилетия.

Гистоны как регуляторы генов

Когда-то гистоны считали всего лишь упаковочным материалом для ДНК. Оказалось же, что эти белки способны как подавлять, так и стимулировать активацию многих генов

МАЙКЛ ГРАНСТАЙН

ВСЕГО каких-нибудь пять лет назад было распространено мнение, что небольшие белки, называемые гистонами, не имеют отношения к регуляции генов. В клеточном ядре гистоны объединяются с длинными цепями ДНК, содержащими гены, образуя так называемый хроматин, из которого построены хромосомы.

Такая недооценка гистонов была обусловлена тем, что, по предположению ряда исследователей, изучающих механизмы функционирования генов, роль этих белков состояла всего лишь в том, чтобы служить упаковочным материалом. Будучи положительно заряженными, они представлялись «шпильками», на которые наматывается несущая отрицательный заряд цепь ДНК, благодаря чему она может уместиться в крошечном клеточном ядре.

Однако постепенно выяснилось, что гистонам принадлежит жизненно важная роль в регуляции генов. По крайней мере гистоны одного типа способствуют активации генов: они стимулируют инициацию транскрипции (т. е. копирования закодированной в ДНК информации с образованием молекул информационной РНК, которые служат матрицами при синтезе белков). А некоторые из гистонов способны подавлять транскрипцию. Теперь уже молекулярные биологи начинают отдавать себе отчет в том, что нельзя установить механизм регуляции генов, не учитывая роль гистонов.

В последнее время ведутся широкие исследования, посвященные вопросу о том, каким образом «включаются» и «выключаются» гены, с целью понять процессы, обеспечивающие формирование многоклеточного организма в ходе эмбрионального развития. Хотя практически все клетки развивающегося организма имеют один и тот же набор генов, дифференцируются они различно. Одни дают начало, например, нейронам, другие — клеткам печени или

крови. В конечном счете образование столь различных клеток определяется тем, что включение и выключение нужных генов в надлежащее время приводят к возникновению различных смесей ферментов и других белков, обеспечивающих специфические свойства каждой клетки.

Когда будут раскрыты механизмы активации и репрессии генов, возможно, удастся понять, почему регуляция этих процессов иногда нарушается, приводя к какой-либо болезни. Например, развитию рака может способствовать чрезмерная активность генов, продукты которых ускоряют размножение клеток, или, наоборот, пониженная активность генов, подавляющих клеточный рост.

РЕГУЛЯТОРНАЯ роль гистонов до последнего времени оставалась вне поля зрения исследователей, поскольку удавалось с успехом индуцировать транскрипцию, подвергая «голую», т. е. не связанную с гистонами, ДНК воздействию клеточных экстрактов, содержащих определенные регуляторные белки. В результате таких «бесклеточных» экспериментов многие биологи пришли к выводу, что в живом организме гистоны не участвуют в регуляции генов.

Как ни ошибочен этот вывод, эксперименты в бесклеточных системах и другие исследования значительно продвинули представления об активации генов. В совокупности со структурным анализом хроматина они проложили путь работам, выявившим в конце концов важную роль гистонов.

К числу наиболее значительных из ранних открытий относится, в частности, установление того факта, что в генах эукариотических клеток (т. е. клеток, имеющих ядро) имеется по меньшей мере три специализированных сегмента. В их число входят кодирующая область, определяющая аминокислотную последователь-

ность белка, и участки, от которых зависят начало и интенсивность транскрипции данной кодирующей области.

Для включения гена необходимо, чтобы на регуляторной области, часто называемой проксимальным промотором, собрался определенный набор белков. Вначале один из этих белков связывается с участком промотора, известным под названием ТАТА-блока (он включает в себя нуклеотидную последовательность типа ТАТАААТА; нуклеотиды, образующие ДНК, отличаются друг от друга азотистым основанием, которых четыре: Т — тимин, А — аденин, G — гуанин и С — цитозин). Затем к первому белку присоединяются остальные, образуя комплекс преинициации.

В образовавшемся комплексе преинициации один из его компонентов, а именно фермент РНК-полимераза, размещается в определенном месте проксимального промотора, называемом сайтом инициации транскрипции. Правильно расположенная полимераза передвигается вдоль кодирующей области (как поезд по рельсам), синтезируя информационную, или матричную, РНК (мРНК). Поскольку в опытах *in vitro* распознавание ДНК белками комплекса преинициации при правильно подобранных условиях приводит к некоторому низкому базальному уровню транскрипции, эти белки иногда называют базальными факторами.

Связывание других белков-активаторов со вторым регулятор-

ным сайтом, расположенным раньше (при движении вдоль цепи ДНК в направлении от ее 5'-конца к 3'-концу) точки начала транскрипции, приводит к максимальному синтезу мРНК. (У многих эукариотических организмов активаторная последовательность, расположенная в цепи ДНК раньше точки начала транскрипции, называется также энхансером, от англ. enhance — усиливать.)

Еще до открытия всех этих деталей исследование химических свойств и структуры хроматина показало, что существует пять основных форм гистонов, обозначаемых Н1, Н2А, Н2В, Н3 и Н4. Впоследствии с помощью рентгеновской кристаллографии и других методов было установлено, что «шпильки», на которые наматывается ДНК, представляют собой октамеры, т. е. каждый состоит из восьми белковых молекул — по две Н4, Н3, Н2А и Н2В.

Вокруг гистонного октамера, называемого кором (сердцевинной), почти в два оборота обматывается цепь ДНК длиной 146 нуклеотидов,

образуя структурную единицу хроматина, называемую нуклеосомой.

У большинства эукариот ДНК удерживается еще и одной молекулой гистона Н1. Этот белок связывается с наружной поверхностью цепи ДНК, намотанной на гистонный октамер, и с обоими концами линкерной (от англ. link — связывать) ДНК, соединяющей между собой две соседние нуклеосомы. Но для образования нуклеосомы гистон Н1 не нужен. Так, у пивных, или пекарских, дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (этот одноклеточный эукариотический организм широко используется в экспериментах по изучению генов регуляции), судя по всему, данный белок если и образуется, то лишь в очень небольшом количестве; тем не менее дрожжевые хромосомы построены из нуклеосом.

Однако у многоклеточных организмов гистон Н1, по-видимому, способствует уплотнению ДНК. В таких клетках подавляющая часть хроматина закручена в волокна диаметром 30 нм, в каждом витке кото-

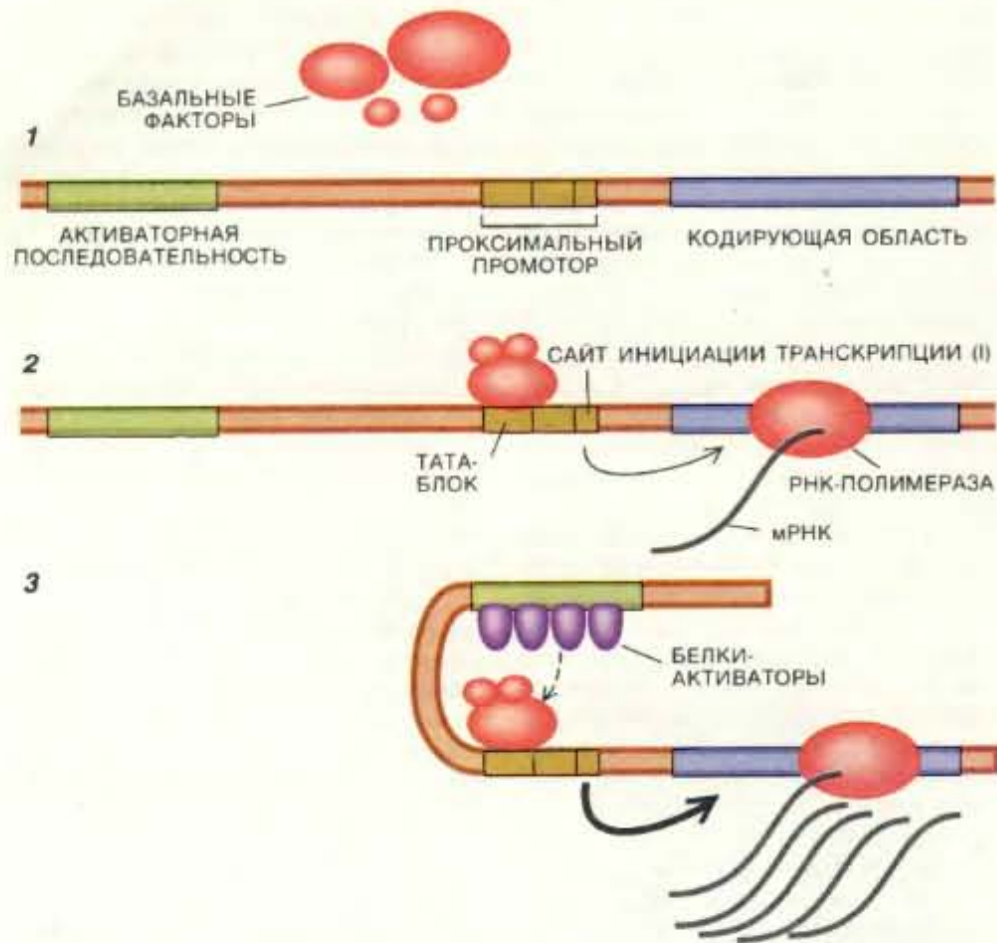
рых примерно по шесть нуклеосом. В отличие от этого в клетках дрожжей большая часть хроматина остается в основном в вытянутой конформации, напоминая нить бусинок диаметром 10 нм — таковы размеры отдельной нуклеосомы.

К СЕРЕДИНЕ 80-х годов несколько исследователей в свете описанных выше данных о структуре и механизме регуляции генов взяли за серьезную проверку предположения о том, что в генов активности регуляторную роль играют не только ТАТА-блоки, активаторные последовательности и связывающиеся с ними белки, а еще, возможно, и гистоны. Ранее, в 60-х годах, в ряде исследований были получены результаты, свидетельствующие, что гистоны могут подавлять транскрипцию. Однако убедительных доказательств этого не было.

Лет через 20 возникла необходимость в более определенных данных. К тому же интерес здесь подогревали открытия эволюционного плана. При анализе аминокислотной



ГИСТОНЫ Н3 (синий) и Н4 (зеленый), которые видны на приведенном здесь тонком срезе трехмерной карты нуклеосомы, способствуют сворачиванию ДНК (желто-коричневое кольцо вокруг гистонов), образуя нуклеосомы — характерный элемент структуры хромосом всех ядерных клеток. Эти белки также играют важную роль в регуляции генов активности.



МОДЕЛЬ АКТИВАЦИИ ГЕНОВ, рассматривающая «голую», т. е. не содержащую гистонов, ДНК. В каждом гене имеются (1) кодирующая область (синяя), несущая информацию об аминокислотной последовательности белка — продукта данного гена, и две основные регуляторные области — проксимальный промотор (желтый) и активаторная последовательность, расположенная до точки начала транскрипции (зеленая). Согласно данной модели, для активации гена (2) к ТАТА-блоку в составе промотора должны присоединиться специфические белки, называемые базальными факторами (красные). При этом один из них — фермент РНК-полимераза — помещается в сайте инициации транскрипции (II), после чего может начать синтез информационной РНК (мРНК), являющейся копией кодирующей области гена и служащей матрицей для синтеза белка. Связывание белков-активаторов (фиолетовые) с активаторной последовательностью (3) приводит к дальнейшей стимуляции базального комплекса (пунктирная стрелка) и максимальному уровню транскрипции (жирная стрелка).

ся только так называемые индуцибельные гены. Такие гены неактивны до тех пор, пока клетка не подвергнется определенному стимулу, например в среде изменится концентрация специфического вещества — сахара или аминокислоты. В отличие от этого активность тех генов, продукты которых постоянно нужны для жизнедеятельности клетки, не повышается.

Последний факт хорошо согласуется с предположением о том, что нуклеосомы подавляют транскрипцию. Постоянно активные гены, по всей вероятности, не содержат нуклеосом в местах своих ТАТА-блоков еще до начала эксперимента. Следовательно, процедура отделения гистонов от ДНК не должна влиять на них.

Более детальное изучение индуци-

бельных генов подтвердило это предположение. Путем различных генетических манипуляций Хан и Л. Дьюррин обнаружили, что в случае многих таких генов исчезновение нуклеосом в области ТАТА-блоков приводит к синтезу мРНК. Из этого следует, что базальные факторы собираются на ТАТА-блоках. Транскрипция наблюдается даже в отсутствие активаторной последовательности до точки инициации. Это свидетельствует о том, что для базального уровня транскрипции достаточно ликвидации нуклеосом, ассоциированных с ТАТА-блоками. У некоторых генов, однако, для усиления транскрипции до максимального уровня было необходимо восстановить эту активаторную последовательность.

Мы с коллегами пришли к выво-

ду, что в живых клетках гистоны, образуя нуклеосомы, действительно подавляют транскрипцию. На основании подобных данных и результатов, полученных *in vitro*, мы предложили новую двухступенчатую модель активации генов.

На первой стадии активации, зависящей от гистонов, белки-активаторы, связавшись с регуляторной последовательностью до точки начала транскрипции, прямо или опосредованно вызывают диссоциацию гистонного октамера и освобождение ТАТА-блока. В результате базальные факторы получают возможность разместиться на ТАТА-блоке и образовать комплекс преинициации, приводя к базальному уровню транскрипции.

На второй стадии, не зависящей от гистонов, активаторы стимулируют комплекс преинициации, обеспечивая максимальное образование мРНК. По нашему мнению, этим объясняется, почему в исследованиях *in vitro* в некоторых случаях наблюдается активация в отсутствие гистонов: вероятно, при этом воспроизводится лишь последняя стадия процесса активации.

В 1988 г. Ф. Уинстон из Медицинской школы Гарвардского университета и его сотрудники получили еще ряд данных, свидетельствующих о роли гистонов в регуляции генов. В своих работах группа Уинстона исходила из открытия Дж. Финка с коллегами из Института Уайтхеда, показавших, что в некоторых мутантных дрожжевых клетках мобильные сегменты ДНК, называемые ТУ (от англ. *transposon yeast* — транспозон дрожжей), встраиваются в ТАТА-блок гена *HIS4*. (*HIS4* кодирует не гистон, а фермент, участвующий в метаболизме аминокислоты гистидина.)

Из-за этого встраивания транскрипция иницируется в пределах сегмента ТУ, а не в начале гена *HIS4*, в результате чего образуется бессмысленная РНК, неспособная служить матрицей для синтеза белка *HIS4*.

Как показала группа Уинстона, в дрожжевых клетках при изменении числа копий генов, кодирующих гистоны H2A и H2B, репрессивный эффект ТУ подавляется и происходит правильная транскрипция гена *HIS4*. Обращение репрессии *HIS4* означает, что гистоны, вероятно, играют более важную роль в регуляции генов, чем предполагалось ранее.

НАКАПЛИВАЮЩИЕСЯ экспериментальные данные все больше убеждают нас в том, что генная ак-

тивность не может регулироваться одним лишь взаимодействием между ДНК и негистоновыми белками. Ликвидация репрессии, определенной гистонами, является необходимым первым этапом активации эукариотического гена. Если это утверждение верно, то следует выяснить, каким образом ослабляются связи между гистоновым октамером и ТАТА-блоком.

Я и мои коллеги полагаем, что ослабление этих связей обусловлено специфическим взаимодействием между белками-активаторами или каким-то посредником и «хвостовым» сегментом одного из гистонов, а именно H4. Каждый гистон в составе октамерной «шпильки» подразделяется на два больших домена. Один из них, в который входит карбоксильный (COOH) конец белка, закручен в плотные гидрофобные (отталкивающие воду) спирали, формирующие основную часть гистонного октамера. Второй домен, хвостовой, т. е. содержащий аминоконеч (NH₂), обладает гидрофильными свойствами (притягивает воду) и не имеет спиральной структуры; по-видимому, он похож на болтающуюся нить.

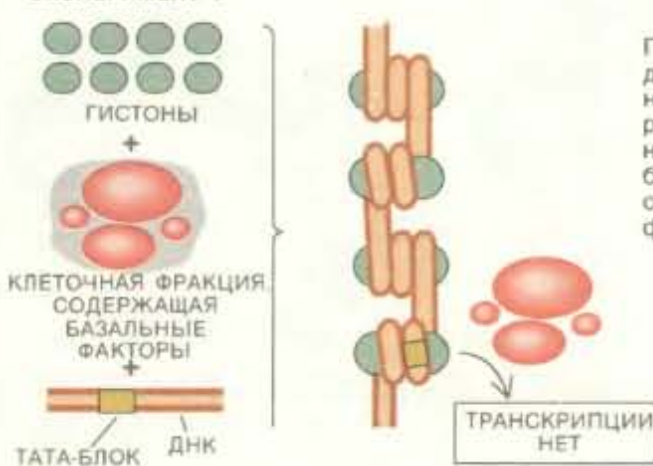
Изучением регуляторной роли гистонных «хвостов» мы занялись отчасти потому, что, как было показано в лабораториях Х. Вайнтрауба (в настоящее время работающего в Онкологическом центре Фреда Хатчинсона), Дж. Уитлока и Р. Симпсона из Национальных институтов здоровья, эти «нити» практически не имеют никакого отношения ни к сборке, ни к стабильности нуклеосом. Но они действительно тянутся от спиральных структур. А по сравнению с гидрофобными доменами эти участки более доступны для взаимодействия с молекулами в локальном окружении хроматина.

Наш интерес к хвостовому домену был обусловлен и другими данными. Еще в 1977 г. В. Оллфри и его коллеги из Рокфеллеровского университета обнаружили, что транскрипция часто сопровождается присоединением ацетильных групп (CH₃CO) к «хвостам» гистонов. Это, по-видимому, должно нейтрализовать их положительный заряд, что в свою очередь может предотвратить взаимодействие хвостовых участков с отрицательно заряженными цепями ДНК. Происходит ли ацетилирование до начала транскрипции или после нее, пока неясно. Однако имеющиеся данные позволяют думать, что хвостовые домены гистонов играют важную роль в высвобождении ТАТА-блоков из нуклеосом.

Важнейшие эксперименты в бесклеточных системах

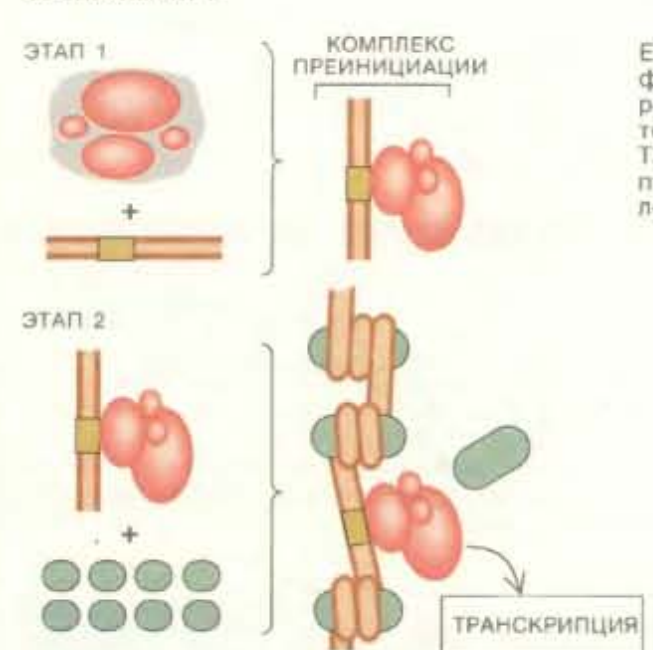
В конце 1980-х годов опыты с экстрактами клеток человека показали, что гистоны и базальные факторы конкурируют между собой за ТАТА-блоки и что обычно побеждают гистоны (эксперимент 1), за исключением определенных условий (эксперименты 2 и 3). Судя по этим данным, в интактной клетке высвобождение ТАТА-блоков из нуклеосом, делающее возможной транскрипцию, происходит, вероятно, под действием белков-активаторов или каких-то других белков, находящихся под их влиянием.

ЭКСПЕРИМЕНТ 1



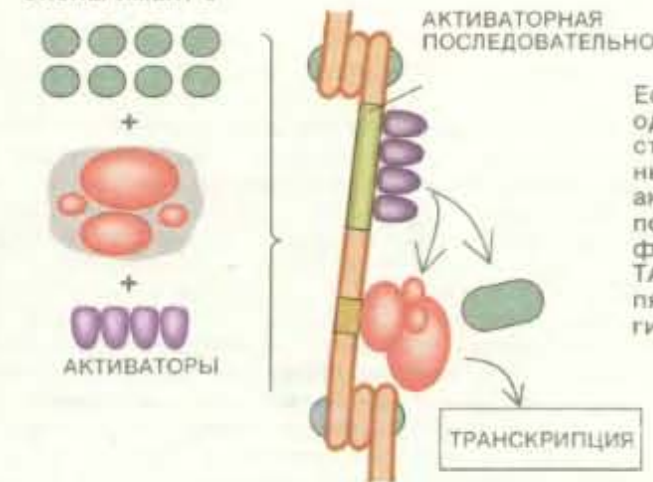
При одновременном воздействии на ДНК гистонов и базальных факторов гистоны образуют нуклеосомы на ТАТА-блоках, препятствуя доступу к ним базальных факторов.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2



Если на ДНК базальные факторы воздействуют раньше гистонов (этап 1), то они связываются с ТАТА-блоками, закрывая путь гистонам, добавленным позднее (этап 2).

ЭКСПЕРИМЕНТ 3



Если ДНК подвергается одновременному воздействию гистонов, базальных факторов и белков-активаторов, последние помогают базальным факторам связаться с ТАТА-блоками, что препятствует связыванию гистонов.

В 1991 г. Дьюррин получила данные, прямо подтверждающие правильность этого предположения. Она удаляла у дрожжей аминокислоты от 4-го до 23-го положения «хвоста» гистона H4 и обнаружила, что в результате сильно подавляется

транскрипция нескольких в норме индуцибельных генов, в том числе генов метаболизма галактозы. Следовательно, для осуществления транскрипции необходимо, чтобы весь удаленный сегмент или какая-то его часть взаимодействовали с

транскрипционным механизмом.

Исходя из этих данных я и мои коллеги в модели генной регуляции усилили роль зависимой от гистонов стадии активации. По нашему предположению, белки-активаторы или белки, на которые они влияют, вытесняют гистоны из комплекса с ТАТА-блоком путем специфического связывания с участком 4—23 в хвостовом домене гистона H4.

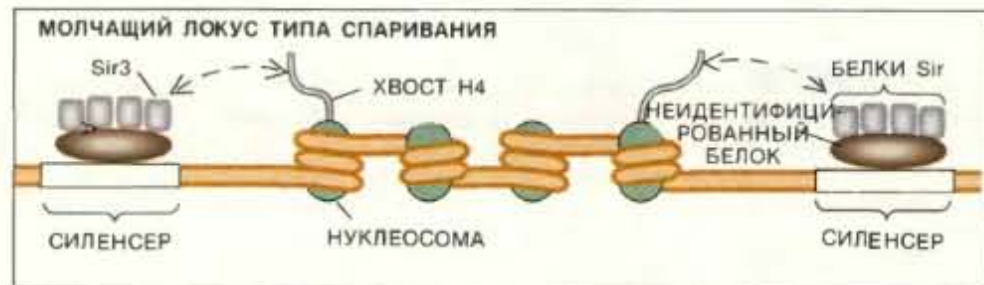
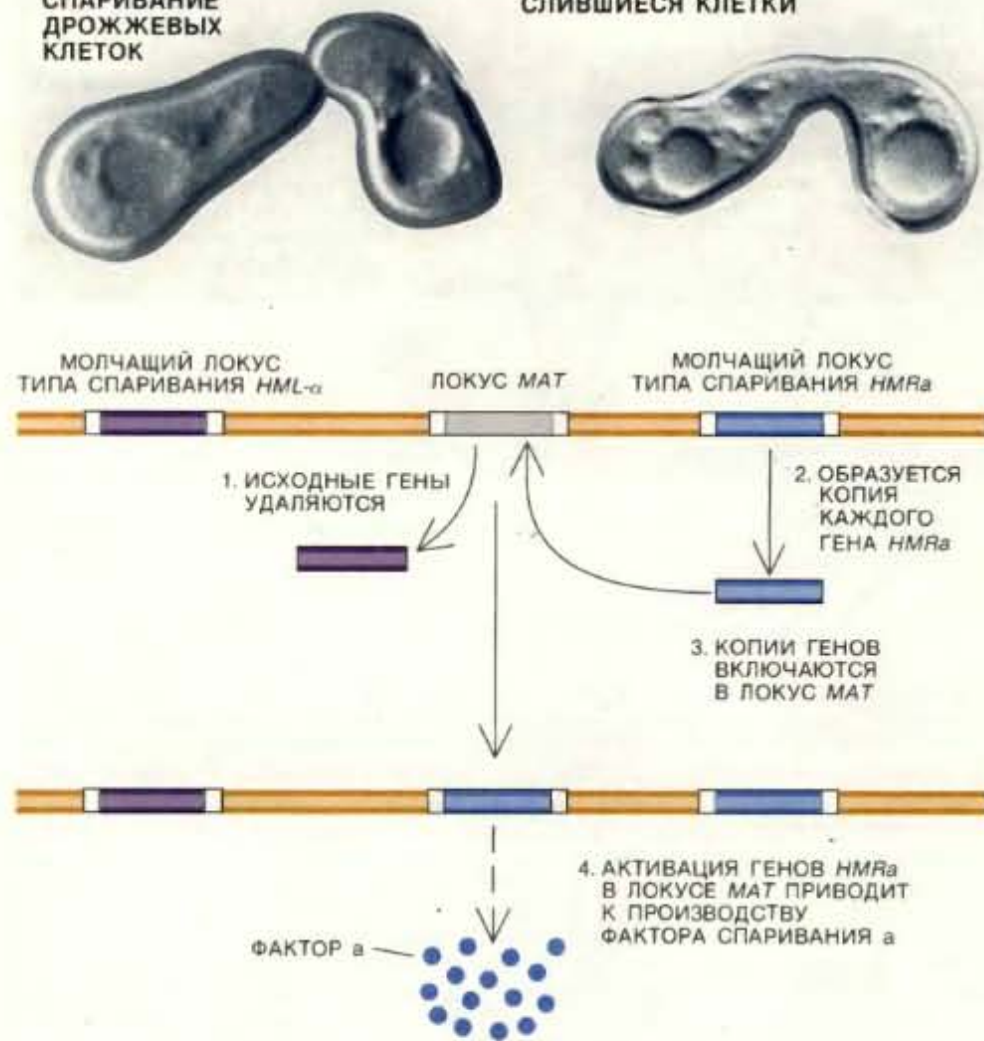
Нетрудно сообразить, почему такое связывание приводит к усилению транскрипции. Наши идеи здесь базируются на представлениях об образовании нуклеосомы и ее развернутом состоянии, частью которых мы обязаны покойному Э. Уорселу, работавшему тогда в Принстонском университете. Он предположил, что формирование нуклеосомы начинается с объединения двух молекул гистона H3 и двух — H4 с образованием тетрамера. Затем на этот тетрамер наматывается ДНК, связываясь с каждой из четырех молекул. (Согласно Фельзенфельду и А. Уолффе из Национальных институтов здоровья и К. Ван-Хольде из Университета шт. Орегон, такой тетрамер стабилен и во многих отношениях ведет себя как полноценная нуклеосома.)

Имеются данные о том, что эта частичная структура направляет последующее присоединение к тетрамеру двух пар H2A—H2B, чем в свою очередь стимулируется дальнейшее закручивание ДНК вокруг гистоновой «шпульки». В Лаборатории молекулярной биологии Совета медицинских исследований Великобритании было установлено, что нуклеосомы, лишенные димеров H2A—H2B, блокируют транскрипцию не столь эффективно, как интактные нуклеосомы. А как показали В. Джексон и Р. Чокли из Университета шт. Айова, гистоны H2A и H2B могут легко отделяться от тетрамера и переноситься из одной нуклеосомы в другую.

Все это говорит о том, что связывание белков-активаторов или посредников их влияния со специфическим местом в хвостовой части гистона H4 вызывает его конформационные изменения. Эти изменения могут приводить к временному отделению гистонов H2A и H2B от нуклеосомы. Вытеснение димеров в свою очередь может вызывать раскручивание входящей в состав нуклеосомы ДНК, которая в результате окажется доступной для базальных факторов. После того как РНК-полимераза пройдет свой путь по ДНК, димеры H2A—H2B могут вновь связаться с тетрамером H3—H4, восстановив структуру нуклеосомы позади фермента.

СПАРИВАНИЕ ДРОЖЖЕВЫХ КЛЕТОК

СЛИВШИЕСЯ КЛЕТКИ



ДРОЖЖЕВЫЕ КЛЕТКИ в процессе спаривания (левая фотография) и после слияния (правая фотография). Чтобы спаривание произошло, клетки должны быть разными по типу спаривания («полу») — α и a . Три генетических локуса, расположенные в одной хромосоме, — $HML\alpha$, MAT и $HMRa$ (верхний рисунок) — обеспечивают переключение клетки с одного типа на другой. Переключение осуществляется тогда, когда гены в локусе MAT заменяются на дубликат генов локуса $HML\alpha$ либо $HMRa$ (2, 3), которые называют молчащими локусами типа спаривания. На своем изначальном месте гены этих локусов никогда не бывают активными, но, если их копия встраивается в локус MAT , происходит ее транскрипция (4). Так, при активности генов $HMRa$ клетка приобретает тип спаривания a . «Молчание» локусов типа спаривания достигается (нижний рисунок в рамке) при участии хвостового сегмента гистона H4, который взаимодействует (пунктирные стрелки) с белком Sir 3 (серый); белки Sir способствуют репрессии генов в пределах данного локуса, оказываемой силенсерами (регуляторными последовательностями, подавляющими генную активность), находящимися по краям локуса (белые).

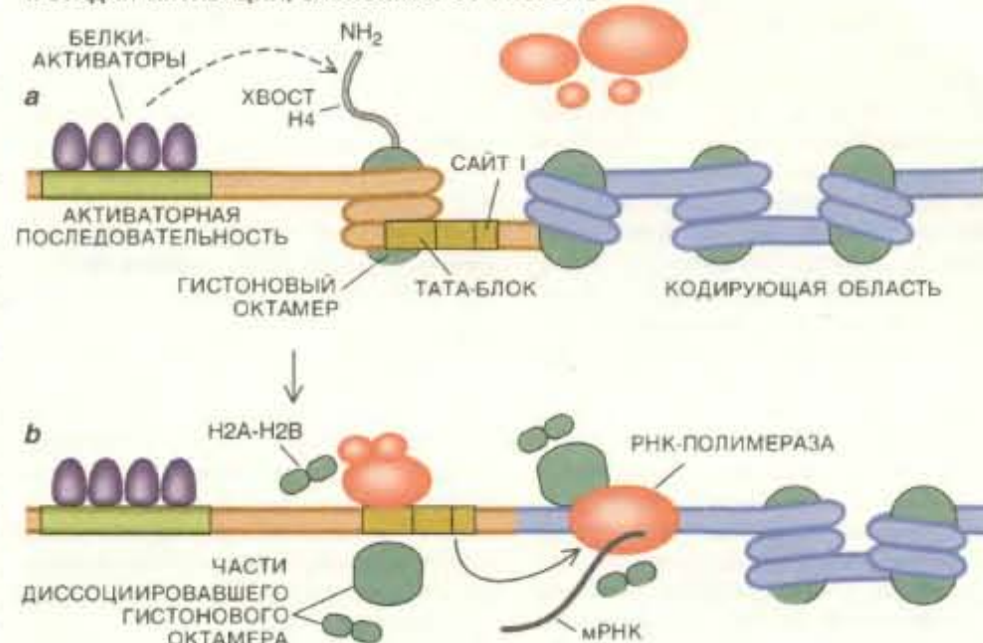
КАК НИ СТРАННО, при исследовании различных сегментов хвостовой части гистона H4 мы обнаружили, что ее участки выполняют ряд разных и подчас плохо совместимых функций. Так, например, хотя определенные аминокислотные остатки между положениями 4 и 23 необходимы для транскрипции нескольких генов, один из сегментов «хвоста» участвует в репрессии других генов.

В моей лаборатории аспирант П. Кейн идентифицировал важную ингибиторную функцию хвостовой части гистона H4: она способствует репрессии так называемых молчащих локусов типа спаривания. В каждой клетке пивных дрожжей имеются две такие генетические области. Они всегда должны оставаться неактивными, поскольку в противном случае клетки станут неспособны к спариванию, т. е. слиянию друг с другом. Дрожжевые клетки спариваются, когда находятся в гаплоидном состоянии, т. е. когда в каждой клетке имеется только один набор хромосом. При слиянии двух гаплоидных клеток образуется одна диплоидная — подобно тому, как при слиянии сперматозоида и яйцеклетки образуется зигота, из которой развивается эмбрион, каждая клетка которого содержит по два набора хромосом — один от матери и один от отца.

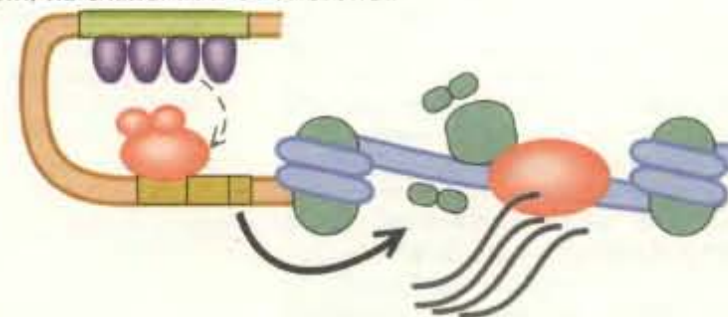
Кейн показал, что при делеции аминокислот с 15-й по 19-ю в хвостовой части гистона H4 резко снижается способность дрожжевых клеток к спариванию. Объясняется этот факт тем, что гены, расположенные в ранее репрессированных участках, теперь активируются. Нашей группой, а также в лабораториях М. Смита из Виргинского университета и Дж. Шостака из Гарвардского университета установлено, что аналогичный эффект производят единичные аминокислотные замены между положениями 16 и 19. Следовательно, каждый из аминокислотных остатков, в норме находящихся в этом участке, необходим для репрессии молчащего локуса типа спаривания.

Как продемонстрировала недавно Л. Джонсон из нашей лаборатории, для репрессии тех же генов требуется также большинство аминокислот между 21-м и 29-м положениями. Кроме того, по ее данным, замена любой из двух аминокислот в белке Sir 3 может противодействовать дефекту спаривания, вызванному мутацией гистона H4. Изменения в белке Sir 3 приводят к репрессии молчащих локусов типа спаривания и к восстановлению способности к

1. СТАДИЯ АКТИВАЦИИ, ЗАВИСИМАЯ ОТ ГИСТОНОВ



2. СТАДИЯ АКТИВАЦИИ, НЕ ЗАВИСИМАЯ ОТ ГИСТОНОВ



УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МОДЕЛЬ активации генов предполагает участие гистонов в регуляции транскрипции (1). Для того чтобы началась транскрипция, необходимо прямое или опосредованное взаимодействие (пунктирная стрелка) белков-активаторов с хвостовой частью гистона H4 на ТАТА-блоке ДНК. Это ведет к частичной диссоциации гистонного октамера (зеленый), возможно, путем отделения гистонов H2A и H2B. В результате ТАТА-блок становится доступным для связывания с базальными факторами (красные) и происходит транскрипция с некоторой низкой скоростью. Максимальный уровень транскрипции достигается согласно модели активации генов в «голой» ДНК (2).

спариванию. Тот факт, что дефект гистона H4 нивелируется специфическим дефектом белка Sir 3, указывает, что в норме эти два белка действуют согласованно, совместно обеспечивая репрессию молчащих локусов типа спаривания.

У дрожжей молчащие локусы типа спаривания расположены вблизи от теломер (концевых участков) хромосомы III. По мнению Д. Готтшлинга из Чикагского университета, хвостовые части молекул гистона H4 участвуют в репрессии и других генов по соседству с теломерами. Группа Готтшлинга обнаружила неожиданный факт: некоторые из тех мутаций H4, которые снимают репрессию молчащих локусов типа спаривания, нивелируют также репрессию генов, искусственно вставленных рядом с теломерами. Таким

же действием обладают дефекты в некоторых белках Sir. По всей видимости, гены, расположенные вблизи от теломер, неактивны за счет того же механизма, что и молчащие локусы типа спаривания.

Исследования спаривания у дрожжей не только выявили новые конкретные детали функционирования гистонов, но и дали инструмент для дальнейшего изучения этих белков. Группа генетических дефектов, называемых в совокупности *swi*-мутациями (от англ. switch — переключение), блокирует активацию дрожжевого гена, кодирующего фермент, необходимый для установления типа спаривания. (По типу спаривания дрожжевые клетки подразделяются на два типа: α и a .) По данным А. Хёрсковица из Калифорнийского университета в Сан-Франциско и его

сотрудников, некоторые другие мутации (называемые *sin*-мутациями) снимают эту блокаду. К ним относятся, в частности, мутация в гене гистона H3; из этого следует, что изменившаяся в результате мутации область гистона H3 способна влиять на генную активность. Открытие других *sin*-мутаций, наверное, укажет на другие сегменты гистонов, регулирующие функционирование генов. Такие мутации помогли бы идентифицировать белки, участвующие в регуляции генной активности путем влияния на гистоны.

Аналогично в лаборатории Уинстона было установлено, что некоторые так называемые *snf*-мутации, полученные М. Карлсоном из Колумбийского университета, по своему эффекту напоминают *swi*-мутации. Возможно, с помощью белков, производимых нормальными вариантами генов, затрагиваемых этими мутациями, удастся осуществить разборку нуклеосом, так чтобы происходила транскрипция. Анализ таких мутаций, как *swi*, *snf* и др., сказывающихся на структуре хроматина, все шире используется при изучении механизмов регуляции генной активности.

ПОСКОЛЬКУ гистон H3 во многих отношениях сходен с гистоном H4 (в том числе по характеру ацетилирования и по роли в формировании и стабилизации нуклеосом), можно, казалось бы, думать, что хвостовая часть гистона H3 участвует в регуляции генов в основном так же, как и H4. Тогда она должна была бы способствовать подавлению молчащих доменов типа спаривания. На деле, однако, этого не наблюдается. Кроме того, по данным сотрудника моей лаборатории Р. Манна, «хвост» гистона H3 требуется для репрессии многих из тех генов, для активации которых нужен «хвост» H4.

Чем объясняются столь различные функции гистонов H3 и H4? Для ответа на этот вопрос необходимо более глубокое понимание взаимодействия этих белков с другими белками и с ДНК. Следует также выяснить, какую роль играют в клетке гистоны H2A и H2B, хотя ясно, что они действуют иначе, чем H3 и H4.

Все, что на сегодняшний день известно о механизмах регуляции генов гистонами, было получено в экспериментах с дрожжевыми клетками. У дрожжей активаторный сайт, расположенный до точки начала транскрипции, по-видимому, никогда не включается в состав нуклеосом. У человека же подавляющая часть хроматина обычно имеет 30-

нанометровую конформацию, а значит, в процессе развития может возникнуть необходимость в активации генов, аналогичные активаторные последовательности которых (энхансеры) включены в нуклеосомы. Как человеческие клетки справляются с этой задачей?

Возможное объяснение, основанное на данных, полученных Х. Бло из Станфордского университета, состоит в том, что в клетках человека есть определенные белки (отличные от активаторов), способные сдвигать нуклеосомы с энхансеров. Возможно также, что гены, которые клетке нужно то «включать», то «выключать» (как большинство генов у дрожжей), содержат энхансеры, всегда пребывающие в состоянии «боевой готовности», т. е. вне нуклеосом.

Предстоит еще очень много работы, прежде чем удастся полностью понять функции гистонов у дрожжей и других организмов. Однако и теперь уже известно достаточно, чтобы отвергнуть старое представление

о гистоновых октамерах как о пассивных «шпильках». Исследования, проведенные нами и другими учеными, убедительно говорят о том, что гистоновые октамеры способны участвовать как в активации, так и в репрессии генов. Здесь могут действовать индивидуальные гистоны, а также специфические домены этих белков. Можно предположить, что определенные регуляторные белки, действуя вместе с активаторами, регулируют активность генов путем специфичного связывания с ДНК или с ключевыми доменами гистонов.

Теперь стоит задача выяснить, какова функция малых сегментов гистоновых доменов, и установить, какие регуляторные белки взаимодействуют с этими сегментами. Многие исследователи, которые прежде пренебрегали гистонами, сейчас работают над такими проблемами. Анализ строения хроматина неожиданно оказался на переднем крае изучения механизмов генной регуляции.

Наука и общество

Эксклюзивный выбор

НЕ НУЖНО слишком далеко заглядывать в историю, чтобы вспомнить примеры «биологических» лекарей, одаривших людей новыми заболеваниями. Так, в некоторых партиях вакцины против желтой лихорадки был обнаружен вирус лейкоза птиц. Несколько лет назад получаемый из человеческого материала гормон роста оказался переносчиком редкого дегенеративного неврологического расстройства, называемого болезнью Крейцфельда—Якоба. Хотя такие случаи нечасты, риск вирусного загрязнения лекарств возрастает по мере того, как все больше препаратов получают путем экстракции из тканей или синтеза в клетках млекопитающих.

Возможно, мембраны со сверхтонкими порами — это как раз то, что нужно фармацевтическим фирмам для удаления малейших следов подобных загрязнений. Здесь развернулась сейчас конкуренция между несколькими американскими компаниями — производителями фильтров, в том числе Millipore, Pall и Micron Separations.

Для уничтожения известных патогенов, потенциально способных загрязнять фармацевтическую продукцию — таких, как вирусы СПИДа, гепатитов В и С и др. — обычно используются высокая температура, ультрафиолетовое облучение, низкий рН,

радиация и сильнодействующие химикаты. «Но для полной уверенности лучше всего очистка, уничтожение и еще раз уничтожение и повторная очистка», — заявляет К. Скрибнер, заведующий отделом гематологических препаратов Управления по контролю качества пищевых продуктов, медикаментов и косметических средств США (FDA). По его словам, когда фирмы обращаются в FDA за разрешением на продажу биологических лекарств, «проверяется способность данной технологии очистки удалять в несколько тысяч раз большие количества вирусов, чем ожидают в исходном материале».

Поскольку вирусы всегда крупнее белков, тонкопористые мембраны, пропускающие белковый продукт, будут задерживать вирусные частицы. Такое фильтрование особенно эффективно, когда молекулы лекарственного вещества и частицы загрязнителя сильно различаются по размеру. Однако даже в лучшем случае белковый продукт проходит через фильтр не полностью, как отмечает П. Сехри, заведующий производством мембран марки Viresolve, разработанных фирмой Millipore в Бедфорде (шт. Массачусетс). Эта компания выпускает оборудование для очистки и анализа биологических соединений и сотрудничает с фармацевтическими предприятиями, обеспечивая как минимум 90%

новый выход очищенного белкового продукта.

Секрет новых мембран — в высшей степени однородный размер пор. В традиционных мембранах, поры в которых образуются путем испарения растворителя из полимера, неизбежно имеются и относительно крупные отверстия. Такие фильтры в принципе могут задерживать 99% вирусного загрязнения, но «для FDA этого недостаточно», как сказал Дж. Мартин, вице-президент по маркетингу фирмы Pall Ultrafine Filtration Company в Ист-Холсе (шт. Нью-Йорк).

Фильтр Viresolve производства фирмы Millipore запатентован. Это сочетание двух мембран — «опорного» слоя и тонкой покрывающей его пленки — является также первым вполне надежным продуктом, предназначенным специально для удаления вирусов. Как поясняет Сехри, чтобы проверить свойства нового фильтра, через него пропускают две несмешивающиеся жидкости. Отношение их проходящих объемов линейно коррелирует с количеством загрязнителя, которое может быть удалено.

«Самое сложное — это переход от биотехнологии к биопереработке», — говорит Д. Хани, вице-президент по маркетингу и торговле фирмы Micron Separations в Уэстборо (шт. Массачусетс). Он подчеркивает, что некоторые продукты, которым не повредило бы антивирусное фильтрование, например плазма крови и ее производные, выпускаются сотнями литров. Однако главными покупателями антивирусных мембран будут биофармацевтические фирмы, запросы которых невелики. Партия интерферона объемом 1 л стоит 1,5 млн. долл. А одной мембраны Viresolve хватает на 20—30 л.

И все же Millipore намеревалась предложить промышленности многообразные мембраны площадью около 1 м² для обработки крупных объемов жидкостей. Иногда, чтобы плыть по течению, требуются большие усилия.

Дебора Эрикссон

Миллиарды бакитьюбов

ЛЕТОМ 1992 г., менее года спустя после того как исследователь Сумио Идзима из NEC Corporation продемонстрировал к удивлению многих ученых первые микрофотографии углеродных цилиндров нанометрового размера, двое его коллег Т. Эббесен и П. Аджаян нашли способ изготовления необычайно прочных трубочек из углерода. Теперь инвесторы проявляют к этой проблеме не меньший интерес, чем ученые.

Вскоре после опубликования этого

метода в журнале «Nature» в корпорацию NEC стали обращаться с вопросами. Компании всего мира хотят производить такие трубочки, поскольку совершенная кристаллическая структура придает им значительно более высокую прочность, чем у любого другого материала, и необычные электрические свойства.

Углеродные трубочки были названы бакитьюбами — от бакминстерфуллеренов, молекулы которых представляют собой 60-атомные сферы, напоминающие по форме геодрический купол, сконструированный Бакминстером Фуллереном (ныне покойным). Бакитьюбы можно рассматривать как «растянутые» фуллерены; они состоят из графитовых слоев между двумя половинами сферического фуллерена. Такие протяженные и шаровидные структуры вместе образуют третью форму углерода наряду с алмазом и графитом. С точки зрения элементарной геометрии алмаз «живет» в трехмерном пространстве, графитовые слои — в двумерном, бакитьюбы — в одномерном, а бакитюбы — в точечном, т. е. в пространстве, не имеющем размерности.

Идзима открыл трубки более года назад, когда он проверял электроды углеродной дуги, примерно такой, какая используется при получении углерода-60 и фуллеренов с другим числом атомов углерода. Он установил, что все трубки имели два или более концентрических цилиндров; их диаметр 2 нм, а длина примерно 1 мкм.

Затем, в марте 1992 г. Эббесен и Аджаян обнаружили, что если изменить давление инертного газа около дуги и регулировать другие параметры, то можно получать осажденную на одном электроде твердую массу диаметром около 5 мм. Когда они скололи кусок этого материала, они обнаружили остов почти чистых бакитюбов. Полная скорость превращения составляла 25% — более чем в 10 раз выше по сравнению с производительностью установок, на которых получают сферические фуллерены.

Эббесен считает, что благодаря столь высокой производительности получение бакитюбов должно быть намного дешевле, чем фуллеренов. Кроме того, гораздо легче наращивать их производство. Поскольку бакитюбы образуются на стержне, а не в самой дуге, как фуллерены, «в принципе можно еще повысить производительность, если использовать стержень большего размера», — говорит Эббесен.

Эббесен и Аджаян уже установили, что смесь различных видов трубок очень хорошо проводит электрический ток, причем отдельные конфигу-

рации обладают исключительно высокой проводимостью. Ученые корпорации NEC сейчас упорно работают над выявлением свойств различных конфигураций. Для этого им вначале нужно получить трубки данного диаметра и определенной структуры и затем измерить проводимость отдельных трубок. На вопрос о том, как они собираются это сделать, Эббесен вежливо уклонился от ответа.

Согласно теоретическим расчетам, наиболее интересные свойства могут быть обнаружены только в трубках меньшего размера (нанометровым диаметром), в которых важную роль будут играть квантовые эффекты. «В соответствии с нашими расчетами формы, обладающие высокой проводимостью, должны иметь совершенную структуру, подобную таким хорошим проводникам, как медь», — заявил Дж. Митмаер, химик-теоретик из Исследовательской лаборатории ВМС в Вашингтоне. — «Подвижность электронов должна быть сравнимой с их подвижностью в графите, но число носителей зарядов у бакитюбов должно быть больше».

Другие разновидности бакитюбов должны быть диэлектриками или полупроводниками. Но пока ни один из них не продемонстрировал сверхпроводящих свойств, как фуллерены при дозировании щелочными металлами. Разнообразные свойства бакитюбов привлекают инженеров-электронщиков, поскольку они открывают новые возможности в создании приборов чрезвычайно малых размеров. Однако, чтобы наладить производство таких приборов, необходима технология, которая обеспечит бы высокую точность и качество их изготовления.

Какова прочность бакитюбов? Д. Томанек и его коллеги из Университета шт. Мичиган подсчитали, что довольно толстый одностенный цилиндр из углерода-200 был бы в 100 раз прочнее, чем иридиевый стержень такой же длины. Эббесен не любит преувеличивать, говоря о стержнях из бакитюбов: «Для нас важна потенциальная возможность использования бакитюбов для упрочнения композитных материалов. Все, что для этого нужно, — правильное соотношение длины и диаметра».

Р. Смолли из Университета Райса, один из тех, кто открыл фуллерены, более склонен к мечтаниям: «Сейчас у вас в руках только волокно, а вам нужно получить непрерывную нить на шпуле, чтобы соткать рубашку», — сказал он. — Мы как раз хотим это сделать, и я уверен, что и NEC тоже пытается достичь того же. Я разговаривал с Идзимой, и он сказал, что это его единственная задача в жизни».

Филип Росс

Поющие гусеницы, муравьи и симбиоз

«Пением» и химическими приманками гусеницы

некоторых бабочек привлекают муравьев, превращая их в своих телохранителей. Те же самые муравьи обычно живут в симбиозе с другими насекомыми, а также с растениями

ФИЛИП ДЖ. ДЕ ВРИС

ВСЯКИЙ, кому случалось во время загородной прогулки закусьвать рядом с муравейником, может подтвердить, что муравьи упорно защищают найденную ими пищу и энергично препятствуют браконьерству на своей территории со стороны других видов, включая человека. Однако некоторые насекомые, в том числе гусеницы потрясающе многих видов бабочек, не только спокойно заходят в муравьиные владения, но и вступают с хозяевами во взаимовыгодные отношения. Это интереснейшие примеры симбиоза, при котором два или более вида живут в тесном взаимодействии. Поскольку случаи симбиоза очень помогают понять сложные взаимоотношения множества видов, они представляют особый интерес для эколога-эволюциониста, изучающего, как и почему у организмов сформировались их специфические признаки и поведение.

Способность вступать в симбиоз с муравьями и использовать их агрессивность хорошо известна для двух крупных групп организмов — растений и растительноядных насекомых (фитофагов) из отрядов Homoptera (равнокрылые: тли, шкады и близкие к ним формы) и Lepidoptera (бабочки). По-видимому, во всех этих случаях главным механизмом поддержания связи с муравьями служит снабжение их пищей в виде вкусных выделений. У растений они секретированы внецветковыми нектарниками на листьях. Привлекаемые этими структурами, муравьи защищают растения от фитофагов. Аналогично, насекомые имеют специальные секреторные органы. Привлекаемые, например, «медвяной росой», выделяемой тлями, муравьи «пасут» их, защищая от хищников.

Мирмекофилия, т. е. способность к симбиотической ассоциации с муравьями, развилась только в двух семействах бабочек — Lycaenidae (голубянки), распространенных по всему

свету, и Riodinidae (эрициниды и другие формы с «металлическим» блеском на крыльях), живущих почти исключительно в тропической Америке. Эти семейства обычно объединяют в группу лиценонидов (голубянообразных). Относящиеся к ним бабочки редко обращают на себя внимание — размах их крыльев менее 5 см, — однако они составляют 40% из более 13 500 известных видов Lepidoptera и поражают разнообразием расцветки и узоров. Сколь приятны взору взрослые особи лиценонидов, столь интересны для эволюционистов гусеницы. У многих из них есть специализированные органы, обеспечивающие симбиоз с муравьями.

За последние 20 лет эти взаимоотношения прояснились благодаря работам К. Коттрелла из Табачного научно-исследовательского управления в Зимбабве, К. Фидлера из Максимилиановского университета в Вюрцбурге, У. Машвица из Университета им. Гете во Франкфурте-на-Майне, Н. Пирса из Гарвардского университета и Дж. Томаса из Института экологии суши (Великобритания), изучавших различных представителей голубянок. Они показали, что характер симбиоза их гусениц с муравьями может варьировать от мутуалистического (взаимовыгодного) до паразитического (выгодного одному участнику в ущерб другому). В некоторых случаях он приводит к усложнению жизненного цикла одного или обоих видов.

До недавнего времени единственным детальным исследованием симбиоза гусениц риодинид с муравьями оставалась выполненная более 20 лет назад работа Г. Росса из Университета шт. Луизиана в Батон-Руж. Таким образом, очень долго представления об эволюции и экологии симбиоза бабочек и муравьев основывались почти исключительно на сведениях о семействе голубянок. Однако в проведенных недавно мной и другими уче-

ными исследованиях гусениц риодинид получены сравнительные данные, позволяющие пересмотреть картину эволюции и последствий симбиотических ассоциаций. В результате сложился новый взгляд на ключевую экологическую роль некоторых видов муравьев.

МОЙ ИНТЕРЕС к взаимодействиям гусениц с муравьями возник несколько лет назад в Брунее на Борнео, где я впервые наблюдал такой симбиоз у одного из представителей лиценонидов. В то время моя работа касалась в основном других аспектов экологии бабочек, однако из случайного наблюдения выросло стойкое увлечение мирмекофильными гусеницами. В последние семь лет многие мои исследования были посвящены симбиозу между муравьями и личинками риодинид в Центральной и Южной Америке.

Наиболее подробно я изучил бабочку *Thisbe irenea*, живущую в разнообразных биотопах тропических лесов от Мексики до Бразилии. Ее гусеницы — типичный пример симбиоза риодинид с муравьями. Самка *Th. irenea* откладывает яйца по одному на молодые деревца рода *Croton*. Гусеницы, вылупившиеся из яиц, питаются этими растениями, которые привлекают муравьев нектарниками, находящимися у основания каждого листа (такие внецветковые структуры широко распространены у тропических деревьев). Муравьи, охраняющие де-

СИМБИОТИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ между этой гусеницей и муравьями выгодны обоим видам. Разнообразные адаптации, включая привлекающие акустические сигналы, позволяют гусенице эксплуатировать территориальные и фуражировочные инстинкты муравьев. Находясь под их охраной, она высасывает сладкую жидкость из внецветкового нектарника растения.

рево от фитофагов, вступают в симбиоз с гусеницами *Th. irenea*.

Когда я начал наблюдать этих бабочек на острове Барро-Колорадо в Панаме, все мои сведения об их гусеницах сводились к тому, что они питаются кротоном и обычно ассоциированы с муравьями. Логично было начать с того, чтобы проследить за судьбой гусениц в отсутствие муравьев. Для этого я удалил с нескольких групп молодых кротонов всех насекомых, а затем смазал основание каждого ствола липкой смолой, тем самым перекрыв всем ползающим видам типа муравьев доступ на деревья, но не лишив бабочек возможности откладывать яйца на их листьях. Однако у половины из этих растений я проложил через смолу мостик (палочку), позволяющий муравьям взобраться на дерево.

Затем в течение 10 месяцев я проводил еженедельный учет численности муравьев и гусениц на всех деревьях. Результаты его показали, что на кротонах с муравьями больше гусениц, чем на тех, куда первые проникнуть не могут. Скорее всего в отсутствие муравьев гусеницы становятся добычей крылатых хищников.

Среди естественных врагов гусениц главную роль играют общественные осы, особенно в тропиках. Значительную часть своей взрослой жизни осы проводят в поисках добычи на расти-

тельности. Обнаружив гусеницу, самка осы убивает ее жалом, расчленяет и переносит по частям в гнездо на корм своим личинкам.

Чтобы проверить, защищают ли муравьи гусениц от ос, я поставил два кротоновых деревца в горшках на участке с большим количеством осинных гнезд и позволил муравьям заселить только одно из этих растений. Затем на каждое деревце я сажал по гусенице и засекал по часам, долго ли они выживают. В результате таких опытов стало очевидно, что без муравьев гусеницы на растениях не задерживаются: часто уже через несколько минут оса их убивает и уносит прочь. Если же рядом находятся муравьи, они решительно защищают гусениц от нападения. Следовательно, хищничеством ос объясняется, почему на тех растениях, где отсутствовали муравьи, я насчитывал меньше гусениц.

КАК продемонстрировали эти простые эксперименты, муравьи полезны личинкам *Th. irenea* тем, что защищают их от врагов. Но симбиоз предполагает следующий вопрос: что получают муравьи в награду за свои усилия? Другими словами, как гусеницы побуждают их рисковать, ставя на защиту организма, не принадлежащего к родной колонии?

Ответ отчасти связан с комплектом специализированных органов, обна-

руженных у гусениц *Th. irenea*. Муравьи обычно не обращают внимания на их первую и вторую возрастные стадии. Только после очередной линьки и перехода к третьей стадии развития гусеницы резко изменяют морфологию, становясь весьма привлекательными для муравьев, которые с этого момента постоянно оберегают их до самого метаморфоза — превращения в бабочку.

На третьей и последующих возрастных стадиях гусеницы обладают тремя типами так называемых «муравьиных» органов, важных для поддержания нужного им поведения муравьев. Наиболее заметна пара выпячивающихся желез — «нектарных» органов. Они находятся на последних сегментах тела и напоминают пальцы резиновой хирургической перчатки. Когда муравей постукивает по заднему концу гусеницы своими антеннами, эти органы выпячиваются наружу и секретированы на вершине каплю прозрачной жидкости, которую муравей жадно слизывает, а затем втягиваются внутрь. Эта жидкость настолько привлекает муравьев, что они без усталости тормашат гусеницу, вызывая ее секрешно. По моим оценкам, муравьи, охраняющие личинку *Th. irenea*, стремятся подкрепиться таким образом по крайней мере раз в минуту.

Те же самые муравьи потребляют секрет внецветковых нектарников





THISBE IRENEA — один из многих видов бабочек, гусеницы которых вступают в симбиоз с муравьями. Мирмекофилия («любовь к муравьям») возникла в ходе эволюции только у бабочек из семейств *Riodinidae* и *Lycaenidae*.

кротона, но, по-видимому, предпочитают ему выделения гусениц. Я и И. Бейкер (ныне покойная) из Калифорнийского университета в Беркли обнаружили, что состав этих двух секретов заметно различается. У гусениц это прямо-таки деликатес. Если внецветковый нектар кротона на 33% состоит из смеси различных сахаров, то в секрете гусениц их почти нет, зато он гораздо богаче аминокислотами. Значит, муравьи получают от гусениц намного более питательный корм, чем от растений, хотя и не такой сладкий.

В то же время сами гусеницы *Th. irenea* неравнодушны к внецветковому нектару кротона. Если они не поедают листья кротона и не ползают по растению, то обычно замирают, склонившись над внецветковыми нектарниками. Серия экспериментов, в которых гусеницы выращивались с доступом и без доступа к такому нектару, показала, что они его пьют, причем это ускоряет их рост. Следовательно, он вместе с другими используемыми в пищу тканями листьев существенно увеличивает темпы развития гусениц *Th. irenea*.

По-видимому, потребление внецветкового нектара широко распространено среди личинок риодинид, вступающих в симбиоз с муравьями. Мирмекофильные гусеницы часто кормятся на растениях с внецветковыми нектарниками. И, напротив, те ви-

ды, личинки которых не вступают в подобный симбиоз, преимущественно питаются тканями растений без нектарников. Используя охраняющих растение муравьев для собственной защиты и питаясь молодыми листьями, мирмекофильные гусеницы-риодиниды извлекают выгоду из «чужого» симбиоза. Они, так сказать, едят одних и эксплуатируют других.

ИЗУЧЕНИЕ нектарных органов лишь частично объясняет симбиоз гусениц с муравьями. Последние — своего рода бескорыстные роботы, обеспечивающие пищу, защиту и заботу о потомстве всей родной колонии. Однако отдельные муравьи иногда остаются около гусениц *Th. irenea* в течение недели и даже дольше. Почему они тратят время на охрану другого вида, а не возвращаются сразу же в гнездо с «выдоенным» секретом, как поступили бы с растительным нектаром и прочими лакомствами?

Ответ заключается в другом типе муравьиных органов гусениц. У личинок *Th. irenea* и других риодинид непосредственно позади головы имеется пара щупальцевидных желез со щетинистыми вершинами, секрет которых, по-видимому, влияет на поведение муравьев. Когда эти органы выпячиваются из тела гусеницы, находясь рядом муравьи почти тотчас же принимают защитную позу —

широко разводят жвалы и подгибают брюшко. Я обнаружил, что, если в такой момент около гусеницы пошевелить мелкой щепочкой или ниткой, муравьи бросаются в атаку на движущийся объект, кусают его и пытаются ужалить.

Эти наблюдения за *Th. irenea* и другими видами риодинид позволяют предположить, что их щупальцевидные органы выделяют какое-то вещество, сходное с феромоном тревоги муравьев, который используется ими для взаимоповещения об атаке на колонию. К сожалению, химическая природа секрета щупальцевидных органов неизвестна, поэтому конкретное сравнение невозможно. Однако ясно, что функция его аналогична: привлечение внимания муравьев к гусенице и удержание их около нее в боевой готовности.

Третий тип муравьиных органов был открыт в 1926 г. энтомологом К. Бручем из Национального музея естественной истории в Буэнос-Айресе, первым описавшим мирмекофильный вид риодинид из Аргентины. Помимо выпячивающихся нектарных и щупальцевидных органов он обнаружил у этого вида пару крошечных подвижных стержневидных придатков, отходящих от переднего края первого грудного сегмента и выступающих над головой. Тогда такого рода придатки не были известны ни у каких других гусениц.

Сорок лет спустя в Мексике Росс описал сходные структуры у другого вида риодинид. Он назвал их вибраторными сосочками и предположил, что их движения вызывают вибрации среды, передающиеся муравьям. Как выяснилось впоследствии, такие муравьиные органы есть у большинства мирмекофильных риодинид.

По моим наблюдениям, вибраторные сосочки *Th. irenea* функционируют в соответствии с описанием Бруча и Росса. Однако я заметил также, что, когда они шевелятся, гусеницы ритмично втягивают голову в «плечи». Меня поразило сходство этих движений с теми, которые свойственны жукам-дровосекам и сопровождаются у них различимыми на слух звуками (по-видимому, хищники, услышав их, отпускают жуков). Хотя никаких заметных звуков гусеницы *Th. irenea* не издавали, у меня возникла уверенность, что и здесь без акустики не обходится.

Истина начала проясняться, когда я изучил эти структуры с помощью сканирующего электронного микроскопа (в Техасском университете в Остине). При большом увеличении на вибраторных сосочках ясно видны поперечные концентрические кольцевые бо-

роздки с острым краем. Вершина головы, которой они касаются при вибрации, несет грануляции (мелкие выступы), напоминающие гитарные медиаторы. На микрофотографиях находящиеся бок о бок сосочки и поверхность головы очень напоминают устройство латиноамериканского ударного музыкального инструмента гуиро из выдолбленной тыквы, на котором играют, водя деревянной палочкой поперек бороздок. Таким образом, и морфология, и поведение гусениц наводят на мысль о том, что их вибраторные сосочки и голова действуют как звукопроизводящий орган.

ОДНАКО никто никогда не слышал, чтобы гусеницы издавали звуки, и такая оригинальная идея требовала проверки. Я вернулся в Панаму с высокочувствительными микрофоном и усилителем. И прямо в день приезда убедился, что моя аппаратура позволяет слышать и записывать акустические сигналы гусениц. Однако, будучи низкоамплитудными, эти сигналы различимы, только если микрофон прикасается к телу гусеницы или к поверхности, на которой она находится. Следовательно, сигналы распространяются по твердому субстрату, а не по воздуху; это отчасти объясняет, почему их не слышно при обычных наблюдениях.

Записывая сигналы отдельных гусениц, а затем удаляя у них вибраторные сосочки, я выяснил, что для способности издавать звуки необходима по крайней мере одна такая структура. Звук сильнее всего, когда присутствуют оба сосочка, и ослабевают почти вдвое при утрате одного из них. Гусеницы, лишённые вибраторных

сосочков, полностью «немеют», хотя продолжают характерным образом двигать головой. Поскольку сосочки сменяются при линьке, «голос» у таких особей восстанавливается, когда они переходят в следующую возрастную стадию. (Это оказалось полезно в экспериментах: прооперированных гусениц можно использовать неоднократно, в том числе в качестве «самоконтрольных».) В совокупности описанные наблюдения подтверждают, что вибраторные сосочки, грануляции на голове и ее движения согласованно действуют как компоненты звукопроизводящего механизма.

Возможность лишать гусениц «голоса» позволяла изучать значение их акустических сигналов для симбиоза с муравьями. Я помещал «немых» и нормальных личинок на одно и то же растение и подсчитывал, сколько муравьев охраняют тех и других в течение определенного времени. Оказалось, что звуки действительно удерживают муравьев вблизи гусениц: около «поющих» особей телохранителей значительно больше. Очевидно, таким личинкам обеспечена и лучшая защита от хищников.

Подобно тому как химические компоненты секрета щупальцевидных органов, по-видимому, имитируют феромоны муравьев, акустические сигналы гусениц, наверное, подражают — хотя бы в некоторых отношениях — звуковой коммуникации симбионтов. Обнаруживая источник пищи или испытывая тревогу, муравьи генерируют вибрации, распространяющиеся по субстрату, на котором они стоят, и привлекающие собратьев. У многих видов при этом наблюдается постукивание по субстрату брюшком, у других же есть развитые звукопро-

изводящие органы. Как выяснилось, у призывов муравьев и гусениц примерно одинаковые частоты сигналов и частоты следования импульсов.

Это сходство свидетельствует о том, что способность гусениц производить звуки и особенности последних эволюционировали под действием давления естественного отбора со стороны муравьев. Другими словами, муравьи, игнорируя незнакомые призывы и реагируя на в чем-то близкие, определяли тем самым, какие из гусениц выживут.

Такое поведение весьма любопытно, поскольку противоречит принятым среди биологов представлениям о коммуникационных системах насекомых, согласно которым эволюция сигналов является результатом прямого отбора по половым или защитным признакам. Например, песни самца сверчка привлекают потенциального партнера для спаривания и предупреждают других самцов о том, что территория занята. Активные певцы получают преимущество перед менее энергичными, поскольку на их сигналы откликается больше готовых к размножению самок. Таким образом, у сверчков способность к издаванию звуков и характеристики последних эволюционируют в результате отбора, производимого самками того же вида.

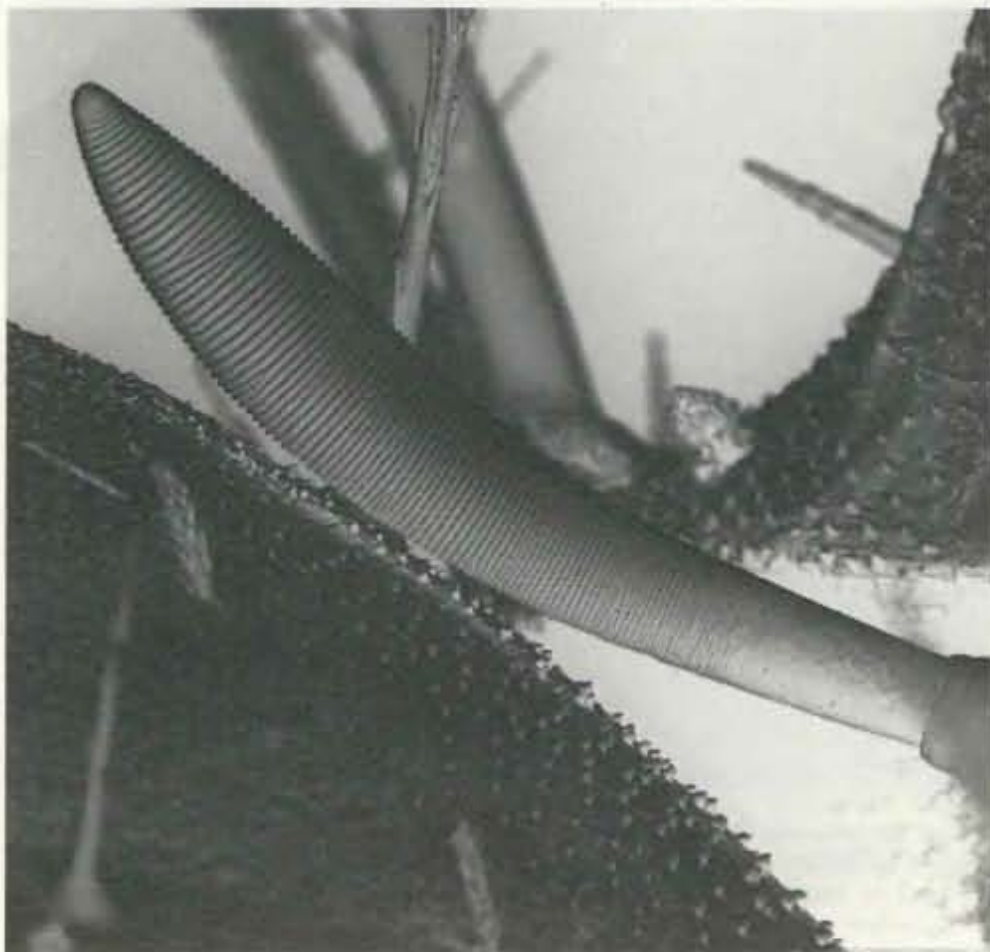
Однако в случае симбиоза гусениц с муравьями на призывы особей одного вида действует отбор со стороны неродственных существ совсем другого вида. Эволюция гусениц направлялась отбором, влияющим на совершенно иные особенности муравьев. Следовательно, здесь открывается новая область изучения коммуникации насекомых.



СИМБИОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МУРАВЬЕВ стимулируется мирмекофильными гусеницами при помощи специализированных «муравьиных» органов. На заднем конце тела гусеницы находятся выпячивающиеся «нектарные» железы, секретирующие вкусную для муравьев жидкость



(слева). Спереди гусеница имеет щупальцевидные органы, выделяющие вещество, сходное с феромоном тревоги муравьев. В ответ на этот сигнал они тут же принимают оборонительную позу (справа) и готовы защищать гусеницу от хищников, в частности ос.



ВИБРАТОРНЫЕ СОСОЧКИ, выступающие над головой из первого сегмента груди, служат гусеницам для производства акустических сигналов, привлекающих муравьев. Каждый сосочек представляет собой стерженек с поперечными кольцевыми бороздками. Когда голова гусеницы ритмически втягивается «в плечи», микроскопические выступы на ее поверхности скользят по этим бороздкам и вызывают вибрацию (слева). Такие структуры напоминают музыкальный инструмент гуиро из выдолбленной тыквы, на котором играют, водя палочкой поперек бороздок (вверху).

СИМБИОЗ муравьев с гусеницами обычно не облигатный, а факультативный, т. е. он выгоден обоим видам, но выживание любого из них отнюдь не полностью определяется присутствием другого. Собственно, роль партнеров в таком симбиозе весьма изменчива, причем в зависимости от биотопа и географического региона данный вид гусениц может образовывать ассоциации с различными видами муравьев. Например, в пределах своего ареала личинки *Th. irenea* в Коста-Рике вступают в симбиоз с одними муравьями, а в Белизе — с другими. Даже в разных местообитаниях одного и того же леса охраняющие этих гусениц виды муравьев часто неодинаковы.

С моей точки зрения, такая изменчивость означает, что акустические сигналы гусениц адресованы не конкретному таксону муравьев, а по-видимому, это скорее генерализованные призывы, на которые могут реагировать многие виды. Чтобы проверить мое предположение, нужно изучить сигналы гусениц, которым свойствен облигатный, видоспецифичный симбиоз с муравьями.

Лучше всего он описан для европейских голубянок рода *Maculinea*, вступающих в симбиотические отношения со строго определенными видами муравьев рода *Myrmica*. Работы Томаса и его сотрудников в Европе вскрыли

удивительное разнообразие жизненных стратегий *Maculinea*; я рассмотрю здесь только один пример. Когда гусеницы этих бабочек достигают третьей возрастной стадии, они падают со своего кормового растения и подбираются муравьями, которые переносят их в свои гнезда, где те ведут себя как хищники, питаясь муравьиными личинками. Хотя такая доставка в муравейник не является видоспецифичной, каждый вид *Myrmica* дает завершать в нем жизненный цикл особям лишь одного определенного вида *Maculinea*, в конечном счете убивая всех прочих хищных гусениц. По всей видимости, давление отбора на гусениц *Maculinea* при формировании симбиоза с подходящим видом *Myrmica* крайне интенсивно.

Я решил проверить, действительно ли акустические сигналы этих гусениц больше похожи на призывы их специфичных хозяев, чем других муравьев. Вместе с Томасом и Р. Кокрофтом из Корнеллского университета мы записали и проанализировали звуки, издаваемые различными видами гусениц *Maculinea* и муравьев *Myrmica*. В каждом случае они были видоспецифичны, но явных указаний на то, что эволюция сигналов гусениц шла в сторону сходства с призывами их симбионтов, не обнаружилось.

Судя по этим наблюдениям, акустические сигналы гусениц привлека-

ют всех муравьев независимо от их таксономической принадлежности. Когда те начинают охранять гусениц, призывы последних сочетаются с функционированием других муравьиных органов гусениц, обеспечивая им непрерывную защиту. В системе *Maculinea*—*Myrmica* для специфичности симбиоза, по-видимому, наиболее важны химические стимулы.

В СВЯЗИ с особенностями симбиоза муравьев и гусениц я заинтересовался механизмом эволюции соответствующих структур и самой мирмекофилии. Среди тысяч видов бабочек она известна только у личинок. В биологии семейств *Lycaenidae* и *Riodinidae* много общего. Для мирмекофильных гусениц обеих групп характерны питательные выделения, химические сигналы и акустические призывы. И, напротив, у немирмекофильных видов этих семейств такие признаки и связанные с ними муравьиные органы отсутствуют; они никогда не издают звуков, даже если близкородственны мирмекофильным формам, способным к акустической сигнализации.

В совокупности эти факты, похоже, опровергают прежнюю гипотезу об эволюции симбиоза гусениц с муравьями и свидетельствуют в пользу другой, новой. Сорок лет назад в обзорной статье о мирмекофильных ба-

бочках Х. Хинтон из Бристольского университета (Великобритания) четко сформулировал три принципа этой эволюции. Во-первых, как считал он, мирмекофилия возникла у бабочек только один раз; во-вторых, это примитивная черта, сохранившаяся после своего однократного появления; в-третьих, в ряде линий голубянок и риодинид способность вступать в симбиоз с муравьями была утрачена.

Сравнение этих семейств между собой и с другими бабочками наводит на мысль о совсем иной эволюционной истории, нежели предложенная Хинтоном. Хотя у представителей обоих семейств есть муравьиные органы, секретирующие питательные и сигнальные вещества, эти структуры развились на разных сегментах тела — у *Lycaenidae* на одних, а у *Riodinidae* на других. Гусеницы голубянок не имеют вибраторных сосочков, но издают звуки; структуры, которыми они это делают, неизвестны. Следовательно, муравьиные органы риодинид и голубянок не гомологичны, а аналогичны друг другу, т. е. сходны, но эволюционно не взаимосвязаны. Таким образом, уже сравнительная морфология подразумевает не однократное, а по крайней мере двукратное появление мирмекофилии у бабочек — самостоятельно в каждом из двух семейств.

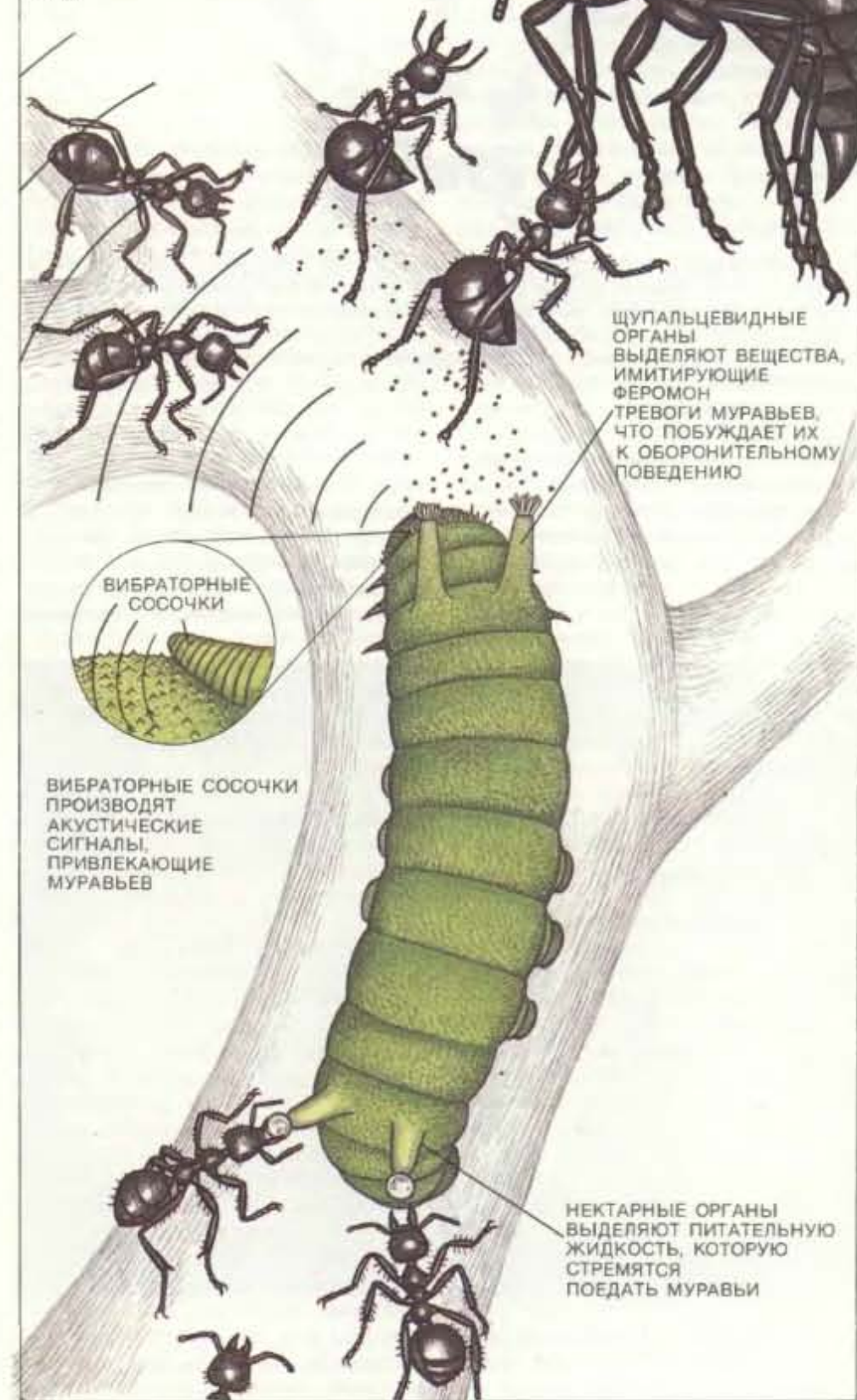
Более того, специфические механизмы мирмекофилии, возможно, возникали как минимум трижды. Гусеницы риодинид из рода *Eurybia* производят акустические сигналы и вступают в симбиоз с муравьями, но, как и голубянки, не обладают вибраторными сосочками. Это подразумевает, что способность к звукопроизводству только среди риодинид появилась не менее двух раз.

Знакомство с немирмекофильными видами также полезно для понимания эволюции симбиоза гусениц с муравьями. Подавляющее большинство личинок бабочек имеют шипы, волоски и особые формы поведения для того, чтобы не подпускать к себе муравьев. У не вступающих с ними в симбиоз гусениц личинок также есть длинные волоски, а муравьиные органы отсутствуют. В целом такие виды больше похожи на прочих бабочек, чем их мирмекофильные сородичи. Это также говорит о возникновении мирмекофилии у личинок по крайней мере дважды, причем относительно недавно.

ИЗУЧЕНИЕ муравьев способствует развитию их симбиоза с гусеницами. Несмотря на кажущуюся внешнюю схожесть различных видов муравьев,

Как гусеница управляет муравьями

МИРМЕКОФИЛЬНЫЕ гусеницы эксплуатируют социальное и симбиотическое поведение муравьев в собственных интересах. Специализированные «муравьиные» органы гусениц способствуют симбиозу с муравьями, либо имитируя их коммуникационные сигналы, либо выделяя, подобно симбиотическим растениям, съедобные жидкости.

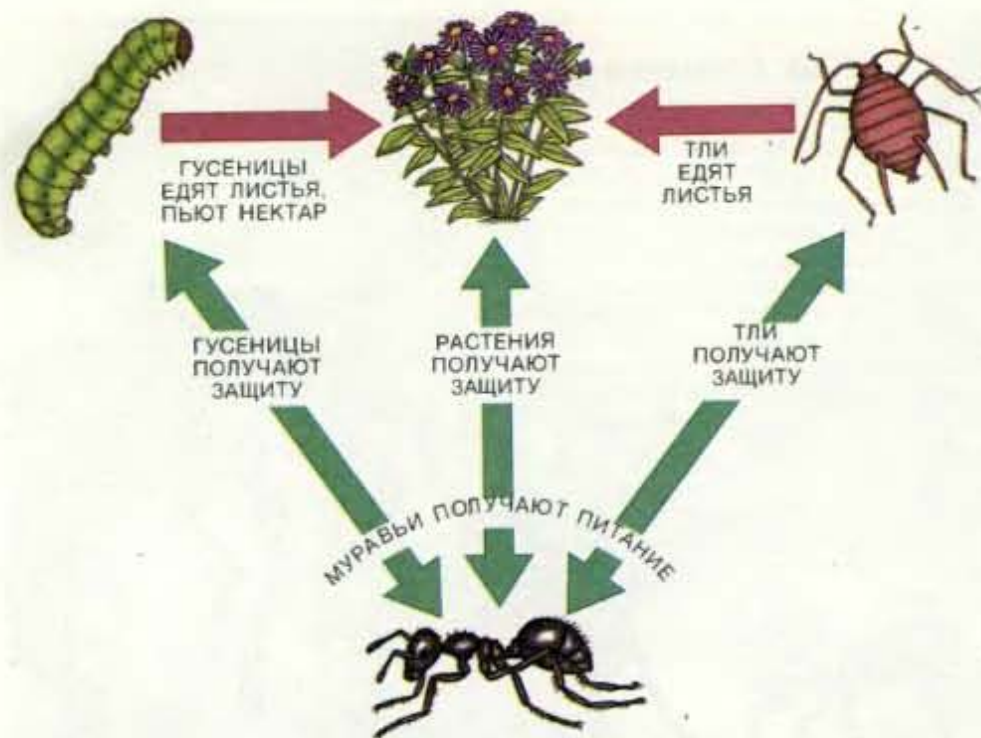


ЩУПАЛЬЦЕВИДНЫЕ ОРГАНЫ ВЫДЕЛЯЮТ ВЕЩЕСТВА, ИМИТИРУЮЩИЕ ФЕРОМОН ТРЕВОГИ МУРАВЬЕВ, ЧТО ПОБУЖДАЕТ ИХ К ОБОРОНИТЕЛЬНОМУ ПОВЕДЕНИЮ

ВИБРАТОРНЫЕ СОСОЧКИ

ВИБРАТОРНЫЕ СОСОЧКИ ПРОИЗВОДЯТ АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, ПРИВЛЕКАЮЩИЕ МУРАВЬЕВ

НЕКТАРНЫЕ ОРГАНЫ ВЫДЕЛЯЮТ ПИТАТЕЛЬНУЮ ЖИДКОСТЬ, КОТОРУЮ СТРЕМЯТСЯ ПОЕДАТЬ МУРАВЬИ



ПЕРЕПЛЕТЕНИЕ СИМБИОЗОВ — обычное явление, поскольку лишь немногие виды муравьев «пасут» другие организмы. В любом местообитании растения, гусеницы и другие насекомые, например тли, вполне могут вступать в симбиоз с одним и тем же видом муравьев. Иногда это даже позволяет мирмекофилам питаться теми растениями, которые муравьи в принципе охраняют от насекомых-фитофагов.

каждому из них свойственна своя тонко настроенная специфика. Например, у некоторых есть растягивающееся брюшко, служащее для запаса жидкостей; они всю жизнь сидят на потолке гнезда, выполняя функцию живых столовых. Муравьи-кочевники специализируются на ловле определенных видов членистоногих. Муравьи-листорезы ловко измельчают листья в «мульчу» для своих подземных грибных садов. Тенденция к специализации среди муравьев так сильно выражена, что их виды часто делят на четыре категории по рационам: хищники, падальщики, семена и другие фитофаги и, наконец, сборщики выделений.

В большинстве исследований, посвященных эволюции мирмекофилии, все муравьи считаются по отношению к гусеницам либо хищниками, либо потенциальными мутуалистами. Однако в противоположность этой точке зрения, по моим наблюдениям, из более 100 видов муравьев, отмеченных мной в Панаме, лишь относительно немногие охотились на гусениц или их «пасли». Когда я предлагал муравьям личинок риодинид или голубянок, представители большинства видов попросту не обращали на них внимания.

Для всех муравьев, «пасущих» гусениц, характерна специфическая экология питания: значительную часть своего времени они проводят за ак-

тивным сбором выделений насекомых из отряда равнокрылых, вцветковых нектарников растений, а также гусениц-симбионтов. Эта черта, обнаруженная мной в Панаме, распространена, как выяснилось, гораздо шире. В симбиоз с личинками бабочек вступают менее 10% всех родов муравьев, существующих на планете, причем они также «пасут» других производящих съедобные секреты насекомых и растения с вцветковыми нектарниками. В их списке явно отсутствуют муравьи, относящиеся к хищникам-генералистам, хищникам, специализированным на членистоногих, фитофагам и семяедам.

Короче говоря, независимо от географического региона — в дождевом лесу Эквадора, саванне Серенгети, меловых котловинах Англии или Центральном парке Нью-Йорка — муравьи, «пасущие» гусениц, охраняют и другие образующие съедобные выделения виды насекомых и растений данной местности. В любом местообитании гусеницы, равнокрылые и растения могут вступать в симбиоз с одними и теми же видами муравьев.

Подобные наблюдения позволяют предполагать, что развитие симбиоза с гусеницами было исторически ограничено лишь малой долей общего разнообразия муравьев. Это меньшинство, по всей видимости, благоприятствовало эволюции насекомых и растений, способных выделять пита-

тельные вещества. После того как их выделения стали важной частью рациона определенных муравьев, любое другое секретирующее такие продукты растение или насекомое могло без труда найти в этих муравьях покровителей, что стимулировало эволюцию новых симбиотических ассоциаций.

ДИНАМИКА симбиозов между гусеницами бабочек, другими насекомыми, растениями и муравьями наводит на мысль еще об одной эволюционной концепции. Поскольку мирмекофильные насекомые-фитофаги и растения используют одних и тех же муравьев, между ними возможна конкуренция. Например, гусеницы *Th. irenea* на кротоне, привлекая «телохранителей», не только обеспечивают собственную безопасность, но и преодолевают систему защиты растения: они получают возможность питаться кротонем, тогда как для большинства других насекомых-фитофагов он недоступен. Гусеницы внедрились в симбиоз муравьев с растением и отчасти нарушили его эффективность. Вполне возможно, что возникновение мирмекофилии позволило растительным насекомым захватывать и эксплуатировать такие ранее сложившиеся симбиотические ассоциации.

Изучение взаимодействующих видов позволяет по-новому взглянуть на мир живого и выработать гораздо более динамические представления о симбиозе. Моя работа начиналась как простое описание отношений между гусеницами *Th. irenea* и муравьями, а вылилась в исследование специализированных «муравьиных» органов, обеспечивающих их симбиоз. Как обычно бывает в экологии, вскоре для хотя бы приблизительного понимания этой системы отношений потребовались сведения о других видах насекомых и растений. Анализ взаимодействий и сходных черт симбиозов привел к выводам, важным для объяснения динамики систем фитофаг — растение и хищник — жертва, коммуникации насекомых и эволюции симбиотических ассоциаций, включающих одновременно растения, муравьев и других насекомых.

Изучение муравьев и мирмекофильных видов, открыв мне лишь некоторые из множества возможных в природе биотических взаимодействий, оказалось необыкновенно захватывающим. Однако всякий раз, останавливаясь на опушке леса и окидывая взглядом унылый ландшафт, оставшийся после его вырубки, я ловил себя на мысли о том, как мало симбиотических связей удается изучить и как много их уже навсегда потеряно.

Наука и общество

В золотой клетке

ПРОМЫВАЯ песок холодных ручьев Аляски, старатели грезил золотыми россыпями, «главной жилой», которая, по их мнению, и отдаст драгоценные крупинки и самородки. Если прав Дж. Уоттерсон из Геологической службы США в Денвере, непосредственное происхождение старательского золота не только геологическое, но в равной мере и биологическое. По его данным, большинство золотых песчинок, присутствующих в проточных водах на Аляске и, возможно, в других местах, образовано бактериями, покрывающимися тонкой оболочкой из чистого золота.

Уоттерсон исследовал золотой песок с помощью электронного микроскопа и обнаружил, что его частицы представляют собой кружевную сеть из шариков микронного диаметра и более тонких перемычек между ними. Часто такие образования сосредоточены на поверхности золотых крупинок, но некоторые крупинки целиком состоят из их плотной массы. Уоттерсон предположил, что это 24-каратные гальванокпии бактерий из рода *Pedomicrobium*. «В большинстве изученных мной частиц различимы остатки микробной морфологии, следовательно, это главным образом вторичное золото, растворенное и пересаживаемое на клетках», — говорит он, — что явно противоречит принятым сейчас представлениям».

Со времен Аристотеля считалось, что россыпное золото, как называются его мелкие частицы, является результатом механического выветривания, разрушения золотосодержащих жил ветром и водой. Только в XX в. стали более понятны химические и биологические процессы, участвующие в образовании минеральных отложений.

Уоттерсон сделал свое открытие через 10 лет после того, как совершенно случайно обнаружил, что растворы золота убивают многих почвенных бактерий. Как он объясняет, вокруг бактериальных спор формируются тонкие золотые оболочки, блокирующие мелкие поры в клеточной стенке, через которые поступают питательные вещества.

Эти наблюдения подтолкнули Уоттерсона к поискам сходных отложений золота вокруг клеток в природе. Рассматривая частицы россыпного золота из ручья Лиллиан-Крик на Аляске, он сразу же заметил многочисленные гальванокпии клеток *Pedomicrobium*. «Это выглядело так,

будто на шоссе разбился грузовик с пинг-понговыми шариками, — вспоминает он. — Они были повсюду». Многие частицы выглядели, как плотные скопления позолоченных клеток. В некоторых образцах золота из Китая и Южной Африки обнаружены сходные очертания бактерий, а это может указывать на участие *Pedomicrobium* и близких к нему микроорганизмов в образовании россыпного золота по всему миру.

По мнению Уоттерсона, *Pedomicrobium* лучше большинства бактерий переносит накопление золота благодаря своему необычному размножению. Обычно бактерии делятся надвое, как бы расщепляясь на две дочерние клетки, а у этого организма часто наблюдается почкование. Поскольку новые клетки, обособляясь от родительской, остаются связанными с ней коротким стебельком, бактерии растут достаточно быстро, чтобы избежать замыкания в «золотой клетке». Почкованием объясняются и относительно крупные размеры образующихся золотых частиц: массы *Pedomicrobium* не распадаются на отдельные клетки.

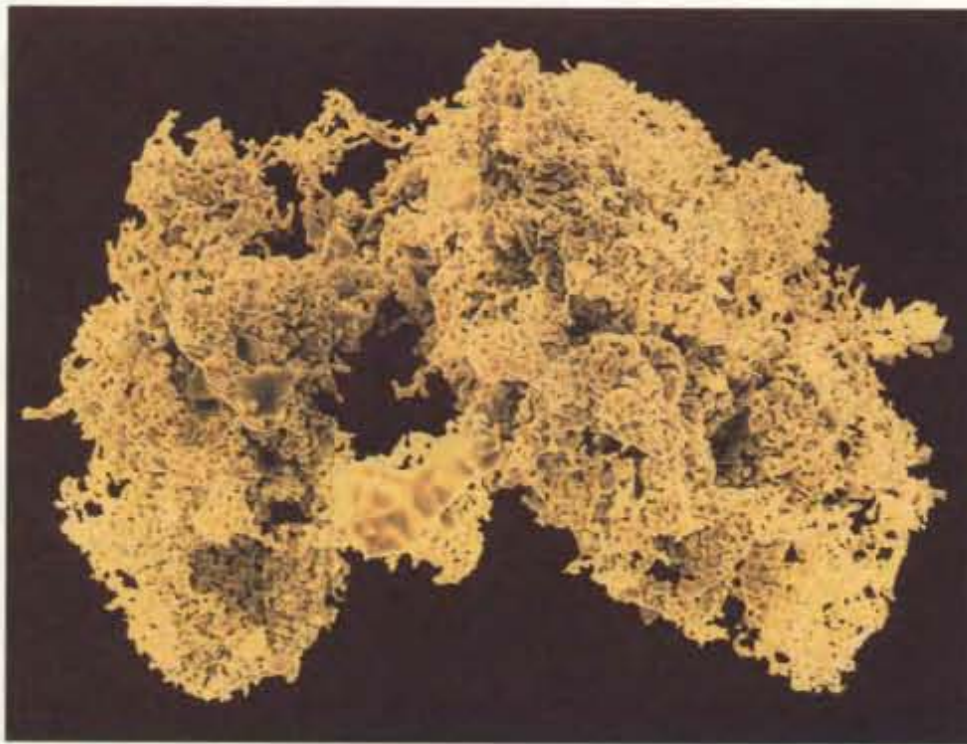
Специалист по биоминерализации С. Манн из Батского университета, указывает, что многие бактерии в определенных условиях покрываются минеральной оболочкой. Независимо от своей способности концентриро-

вать золото клетки *Pedomicrobium* накапливают вокруг себя оксиды железа и марганца в трубах гидроэлектростанций и сходных местообитаниях, богатых растворенными минеральными веществами. Однако обычно эти отложения являются бесформенными продуктами случайных взаимодействий между ионами металлов и различными выделяющимися из клеток молекулами. Как отмечает Манн, золотые оболочки уникальны тем, что почти лишены примесей.

Специфичность, с которой бактерии аккумулируют золото, предполагает избирательное притягивание какими-то компонентами их клеточной стенки золотых комплексов. На вопрос, зачем золото микроорганизмам, Уоттерсон отвечает, что это для него пока полная загадка. По мнению Манна, осаждаемые золотые комплексы могут служить акцепторами электронов, образующихся в некоторых внутриклеточных биохимических процессах.

Манн полагает, что если существует белок клеточной стенки, превращающий *Pedomicrobium* в золотых «жуков», то в принципе возможно клонировать кодирующий его ген и перенести этот ген в другие бактерии с промышленными целями. Многие горнодобывающие компании уже используют бактерии для извлечения металлов из бедных руд. Какой-нибудь старатель XXI в. наверняка также попытается приручить этих микроскопических Мидасов.

Джон Ренни



ЗОЛОТАЯ ЧАСТИЦА около 0,1 мм в поперечнике — это 24-каратная масса бактерий, накапливающих вокруг себя золото. (Фотография: John R. Watterson.)

Полупроводниковые алмазные пленки

Тонкие пластинки алмаза, выращенные из газа при низком давлении и допированные специальными добавками, могут стать основой для создания электронных приборов нового поколения

МАЙКЛ У. ГЕЙС, ДЖОН К. АНГУС

АЛМАЗ — самый твердый материал из всех ныне известных и в наименьшей степени, чем какой-либо другой материал, поддается сжатию. Алмаз обладает также лучшей теплопроводностью при комнатной температуре и, если в нем нет дефектов и посторонних включений, это один из самых прозрачных для видимого света материалов. Свойства алмаза обусловлены его необычной кристаллической структурой: атомы в кристалле алмаза упакованы плотнее, чем в любом другом известном материале. Кроме того, силы, связывающие атомы в алмазе, намного прочнее, чем у большинства других твердых веществ.

Помимо чисто научного интереса необычные свойства алмаза делают его весьма полезным для технических целей. Этот драгоценный камень широко используется как абразив в промышленности, как режущий инструмент в хирургии и как теплоотвод в электронных приборах. Ученые установили также, что алмазы, содержащие различные примеси, ведут себя как полупроводники, хотя природные кристаллы слишком малы и дороги для практического применения.

Сейчас положение в этой области исследований меняется. В течение последних пяти лет специалисты разработали немало технологических приемов для получения методом осаждения алмазных пленок, толщина которых может лежать в пределах от 1 мкм и более до величины, измеряемой несколькими сотнями атомов. Эти методы, среди которых есть такие, которые позволяют получать большие плоские кристаллы, могут сделать алмазные полупроводники практически полезными. Если это удастся, то можно будет создавать приборы во много раз более быстродействующие, чем аналогичные приборы на кремнии, и способные работать при температуре до 700°C, когда любой другой электронный прибор разрушился бы.

Чтобы реализовать эту потенциальную возможность, мы и ряд других исследователей пытаемся усовершенствовать методы выращивания, которые позволили бы получать большие по размеру кристаллы алмаза и более высокого качества. Наряду с другими специалистами мы исследуем также методы, позволяющие с большой точностью вводить в алмаз примеси, чтобы получать заранее заданную проводимость, и пытаемся найти способ травления материала для получения на нем схемного рисунка.

НАЧИНАЯ с конца XVIII в., когда Антуан Лоран Лавуазье впервые установил, что алмаз представляет собой кристаллическую модификацию углерода, ученые-экспериментаторы не перестают пытаться синтезировать его искусственным путем. Первым, кто преуспел в этом, был У. Эверсол из фирмы Union Carbide, который в 1952 г. вырастил кристаллы алмазных зерен из монооксида углерода и углеводорода в газовой фазе при сравнительно низком давлении. Большинство же первых исследователей в этой области пытались вырастить кристаллы алмаза в условиях высоких давлений, при которых графит можно превратить в алмаз.

При обычных условиях самой устойчивой формой углерода является графит. Однако если давление достигает примерно 60 тыс. атм, а температура превышает 1500°C, то термодинамически стабильной фазой становится алмаз. Природные алмазы, по-видимому, также кристаллизуются при высоких давлениях. В процессах выращивания кристаллов алмаза, протекающих при высоких давлениях, углерод растворяется в растворе переходного металла, который служит одновременно и растворителем, и катализатором; с течением времени в этой фазе образуются зародышевые зерна кристаллов алмаза, которые затем начинают расти.

В 1953 г. группа шведских ученых из

Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) синтезировала алмаз при высоком давлении, но по непонятным причинам этот факт они решили не предавать огласке. В 1955 г. американская компания General Electric объявила об успешных работах в этой области. Технология выращивания алмаза при высоких давлениях требует очень дорогостоящего оборудования, поэтому только самые крупные промышленные компании могут осуществить этот процесс. Общий ежегодный объем производства искусственных алмазов в мире в настоящее время составляет лишь около 100 т.

Пока совершенствовались методы выращивания алмазов при высоких давлениях, многие исследователи рассматривали синтез алмаза при низком давлении как нечто похожее на превращение свинца в золото, невозможное с точки зрения фундаментальных законов термодинамики. При низких давлениях графит более стабилен, чем алмаз, и поэтому считалось, что алмаз не может образоваться, а если бы он образовался, то сразу же превратился в графит. На самом деле существование более стабильной формы углерода (графита) не мешает росту метастабильной формы (алмаза). Метастабильные материалы повсюду образуются в природе. Так, углерод, который образуется в виде сажи от горячей свечи, тоже метастабильен; он находится даже в более высоком энергетическом состоянии, чем алмаз.

В метастабильном состоянии материалы могут оставаться очень долго, пока энергетические барьеры, которые необходимо преодолеть, чтобы достичь более стабильного состояния, будут достаточно высокими. Разность энергий атомов углерода в алмазе и графите составляет около 0,5 ккал/моль, что значительно меньше энергии, необходимой для плавления маргарина. Однако, чтобы алмаз мог превратиться в графит, необходима дополнительная энергия для

разрыва всех его связей, что фактически означает превращение алмаза в пар. Если бы алмаз каким-то путем можно было заставить образоваться из газа при низком давлении, то превратиться в графит ему было бы уже не так просто.

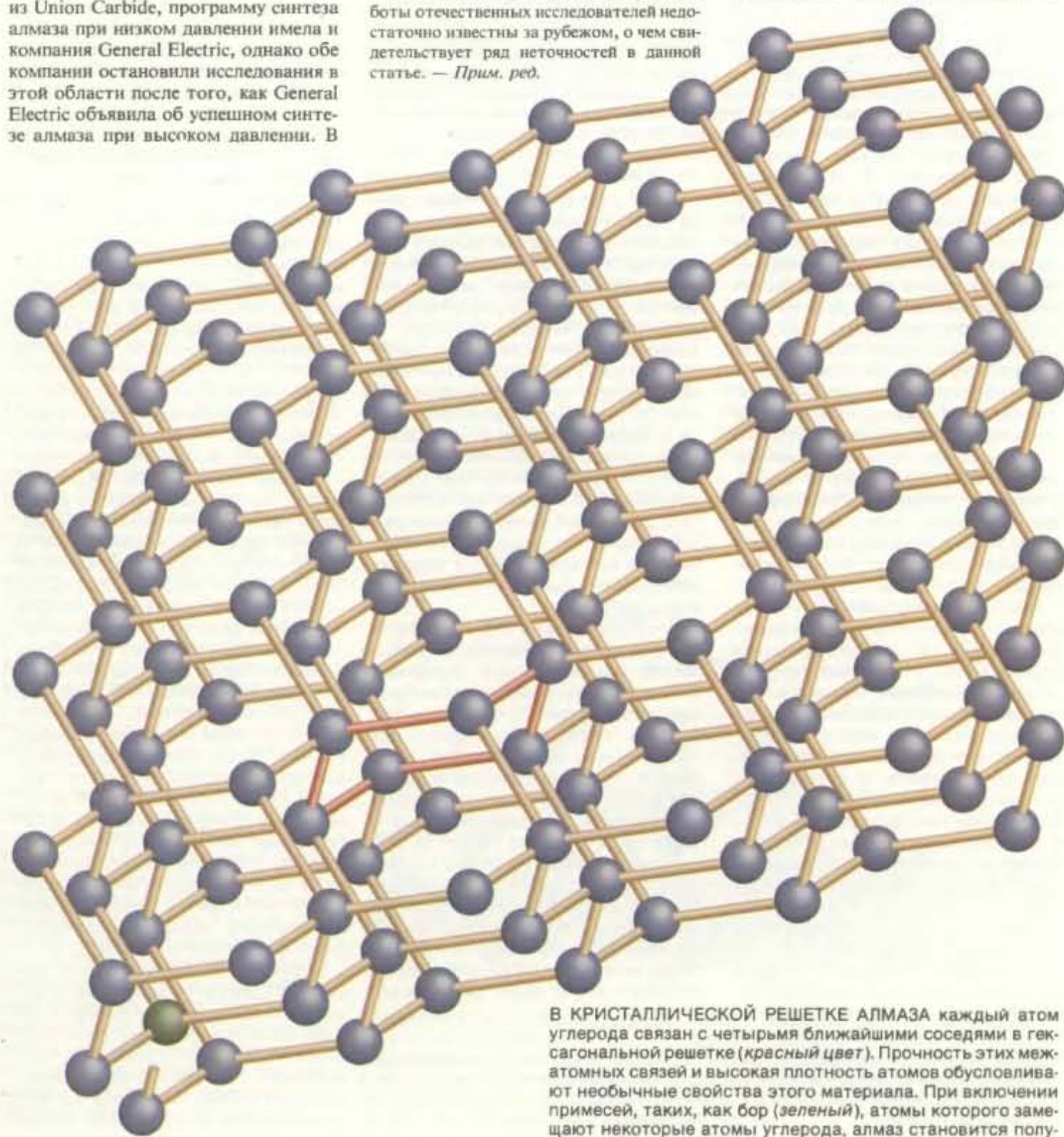
Несмотря на то что выращивание алмаза при низком давлении оказалось невозможным, некоторые ученые пытались это сделать, рискуя напрасно потратить годы своей научной работы. История исследований в этой области полна ошибок и неудач. Помимо первых шагов, предпринятых в этом направлении Эверсом из Union Carbide, программу синтеза алмаза при низком давлении имела и компания General Electric, однако обе компании остановили исследования в этой области после того, как General Electric объявила об успешном синтезе алмаза при высоком давлении. В

1956 г. Б. В. Спицын (тогда аспирант Института физической химии АН СССР в Москве) предложил выращивать алмазы путем термического разложения тетраоксида углерода на зародышевые зерна алмаза. В 1959 г. один из нас (Ангус), бывший тогда аспирантом Мичиганского университета, предложил несколько аналогичных методов. Ни одно из этих предложений не получило широкой огласки, и первые исследователи в этой области не были осведомлены о работе друг друга*.

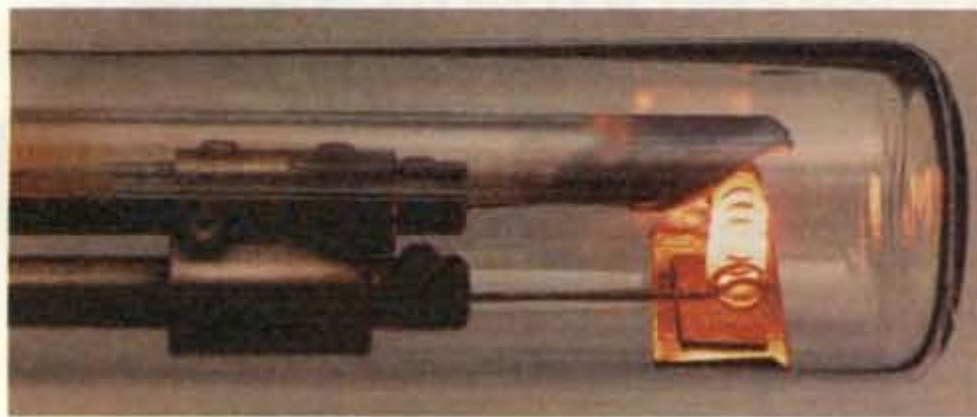
* К сожалению, и в настоящее время работы отечественных исследователей недостаточно известны за рубежом, о чем свидетельствует ряд неточностей в данной статье. — Прим. ред.

К середине 60-х годов научная деятельность в этом направлении была уже на закате. Единственным признаком ее жизни было огромное число патентов, в которых некоторые утверждения были просто нелепыми. Самым невероятным из них было, пожалуй, утверждение о том, будто алмазы можно вырастить путем вращения велосипедного колеса с такой большой скоростью, что под действием центробежных сил содержащийся в резиновой шине углерод может превратиться в алмаз.

В 1965 г. Ангус перешел на работу в Университет Кейс-Вестерн-Резерв в



В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ АЛМАЗА каждый атом углерода связан с четырьмя ближайшими соседями в гексагональной решетке (красный цвет). Прочность этих межатомных связей и высокая плотность атомов обуславливают необычные свойства этого материала. При включении примесей, таких, как бор (зеленый), атомы которого замещают некоторые атомы углерода, алмаз становится полупроводником.



КАМЕРА ОСАЖДЕНИЯ для выращивания алмазных пленок состоит из подложки, на которой образуются кристаллы, вольфрамовой нити накала и газового питателя, по которому подаются газообразный водород и простой углеводород типа метана. В камере поддерживается давление примерно в 10 раз меньше атмосферного. Газы нагреваются нитью накала, и молекулярные связи в них разрываются. Образующийся в результате атомарный водород вытравливает весь углерод, осаждающийся в виде графита, тем самым обеспечивая рост только кристаллов алмаза. В лабораторных условиях вместо вольфрамовых нитей накала ученые использовали СВЧ-разряды и даже ацетилено-кислородные горелки.

Кливленде (шт. Огайо). Цель его научной работы заключалась в получении убедительных экспериментальных результатов по выращиванию алмазов при низких давлениях. Вместе со своими коллегами Анкус в течение года повторил результаты, полученные Эверселом. Для доказательства того, что они действительно синтезировали алмаз, исследователи добавили небольшое количество гидрида бора (диборана) к источнику газа метана и получили полупроводниковый алмаз голубого цвета. (Другие формы углерода не проявляют этого эффекта при добавлении бора.) Однако скорость роста кристаллов алмаза была настолько низкой, что этот метод не годился для промышленных целей.

Причина такого медленного роста кристаллов представляла неразрешимую проблему: любые изменения температуры или давления, которые ускоряли осаждение алмаза, в еще большей степени ускоряли отложение графита. Основная задача заключалась в поиске способов подавления образования графита, в большинстве случаев с помощью атомарного водорода. Атомарный водород реагирует с любыми соединениями, предшествующими графиту, с образованием молекулярных структур, очень похожих на алмаз. Он реагирует также со свободными связями на поверхности алмаза, образуя конфигурацию из углеродных атомов, более близкую к внутренней кристаллической решетке алмаза. Наиболее вероятно, что новые атомы углерода, осевшие на поверхности, затем внедряются в кристаллическую структуру, а не образуют аморфную структуру или структуры, подобные графиту.

Анкус и его коллеги из Университета Кейс-Вестерн-Резерв сначала использовали атомарный водород в замкнутом цикле. В их установке осаждались алмаз и графит, затем их поверхность обрабатывалась водородом, чтобы вытравить графит, и вновь осаждались алмаз и графит. Этот метод, в котором для диссоциации молекул водорода использовалась раскаленная вольфрамовая нить, был описан авторами в материалах конференции, состоявшейся в Киеве в 1971 г. Впоследствии русские ученые во главе с Б. В. Дерягиным из Института физической химии в Москве разработали метод непрерывного осаждения, в котором графит в процессе образования удалялся с помощью водорода*.

Опубликованная в 1976 г. эта работа была первым примером получения алмаза на неалмазной подложке. Впервые скорость выращивания была достаточно большой, чтобы эта технология стала перспективной для практического использования. Хотя русские ученые рассказали о полученных ими алмазах, они не сообщили об используемом методе осаждения, поэтому лишь немногие ученые из других стран серьезно отнеслись к этому сообщению. Кроме того, примерно за пять лет до этого та же группа сначала «открыла», а затем «закрывает» так называемую поливоду, по-видимому представляющую собой полимеризованную форму воды, свойства ко-

* Следует отметить, что впервые непрерывный процесс был реализован в 1966 г. Б. В. Спицыным с сотрудниками. — Прим. ред.

торой, как оказалось, обуславливались содержащимися в ней примесями. Этот не внушающий доверия факт вызвал большой скептицизм в отношении реальной возможности выращивания алмазов при низких давлениях из любого источника.

Однако в период 1981—1983 гг. группа японских ученых из Национального исследовательского института неорганических материалов в Цукуба нашла способы быстрого выращивания алмазных пленок при давлениях ниже атмосферного. Набуо Сетака, Йоширо Сато, Сейнширо Мацумото и Муцуказу Камо с коллегами использовали вольфрамовые нити накала и сверхвысокочастотные разряды для получения атомарного водорода, необходимого для получения алмазных пленок.

Эти методы пока являются самыми распространенными, хотя есть и другие, в которых используются разряды на постоянном токе и радиочастотах. В наиболее интересном методе Йоки Хиросе из Технологического института в Ниппоне осаждал алмаз из пламени кислородно-ацетиленовой газовой горелки. Такое пламя дает и атомарный водород, и углеводороды низкого молекулярного веса, которые конденсируются в алмаз.

ПОСЛЕ успеха японцев американские и европейские ученые быстро вернулись к забытым работам в этой области. Б. Люкс из Технического университета в Вене объединил усилия европейских ученых в разработке технологии выращивания алмазов при низких давлениях. В 1984 г. Т. Антони и Р. Деврис из компании General Electric возобновили работы по получению искусственных алмазов при низком давлении, а М. Пиниео организовал первую фирму Crystallume в Менло-Парке (шт. Калифорния), специализирующуюся на производстве алмазных пленок. В 1985 г. Научно-исследовательское управление ВМС США стало финансировать широкомасштабные работы в Университете шт. Пенсильвания, Университете шт. Северная Каролина и Лаборатории им. Линкольна Массачусетского технологического института. В настоящее время исследованиями в области синтеза алмаза при низком давлении занимаются сотни лабораторий многих стран мира.

Получение алмазных пленок открывает другую возможность — создавать полупроводники на основе алмаза, но на этом пути предостоят преодоление еще немало трудностей. Первая из них — это производство тонких пленок, которые подходили бы для использования их в диодах и транзи-

сторах. Большое разнообразие методов выращивания обеспечивает получение поликристаллических пленок, состоящих из огромного числа мельчайших зерен. Неупорядоченность в расположении атомов на границах зерен делает такие пленки неподходящими для полупроводниковых приборов.

Существует один метод получения высококачественных пленок большого размера с использованием шаблонов — подложек из монокристалла такого материала, кристаллическая структура и расстояние между атомами в котором примерно такие же, как у алмаза. Подложка вынуждает алмаз в процессе роста формироваться в определенной кристаллографической ориентации. Кристаллы никеля, меди, карбида кремния, оксида бериллия и нитрида бора имеют подходящий период кристаллической решетки и уже используются в качестве шаблонов для выращивания кристаллов алмаза методом, называемым гетероэпитаксией. Однако алмазы, выращенные до сих пор на подложках из первых четырех перечисленных выше материалов, настолько малы и имеют так много дефектов, что не могут быть использованы в промышленном производстве электронных приборов. Некоторые алмазы высокого качества были выращены этим методом на нитриде бора, но получить подложку в виде монокристалла нитрида бора — задача еще более трудная, чем вырастить монокристаллическую алмазную подложку.

Сотрудники Лаборатории им. Линкольна, Университета Уэйна, Исследовательской лаборатории ВВС, Университета шт. Северная Каролина и Университета Кейс-Вестерн-Резерв разработали альтернативный метод. Они использовали решетку небольших зародышевых кристаллов одинаковой кристаллографической ориентации. Алмаз осаждался на поверхность зародышевых кристаллов и приобретал ту же ориентацию.

Эти зародышевые кристаллы получают в течение нескольких часов старым методом выращивания при высоком давлении. Образовавшиеся кристаллиты счищают и затем сортируют по размеру и форме. С помощью последовательного просеивания через сита отбирают только кристаллы, имеющие поперечный размер около 0,1 мм. Одинаковые по величине кристаллы высыпают на наклонный вибростол. Кристаллы, имеющие округлую форму, скатываются вниз и в дальнейшем не используются, а ограненные кристаллы под действием вибрации перемещаются вверх и попадают в сборный лоток.

Пока готовятся зародышевые кристаллы, на кремниевой пластине с помощью обычного метода травления, используемого в производстве интегральных микросхем, изготавливается матрица с лунками пирамидально-профиля, каждая поперечным размером также около 0,1 мм. Поскольку кремний имеет такую же кристаллическую структуру, как и алмаз, форма вытравляемых лунок точно соответствует октаэдрической форме кристаллов алмаза.

Зародышевые зерна погружают в жидкость и получают суспензию, в которую опускают кремниевую матрицу. Суспензию, взбалтывают и некоторые кристаллы попадают в лунки, остальные удаляются. При наличии алмазных зерен с хорошей огранкой и тщательном контроле за чистотой суспензии более 95% лунок заполняются алмазными зернами, ориентированными по отношению друг к другу в пределах нескольких десятых долей градуса.

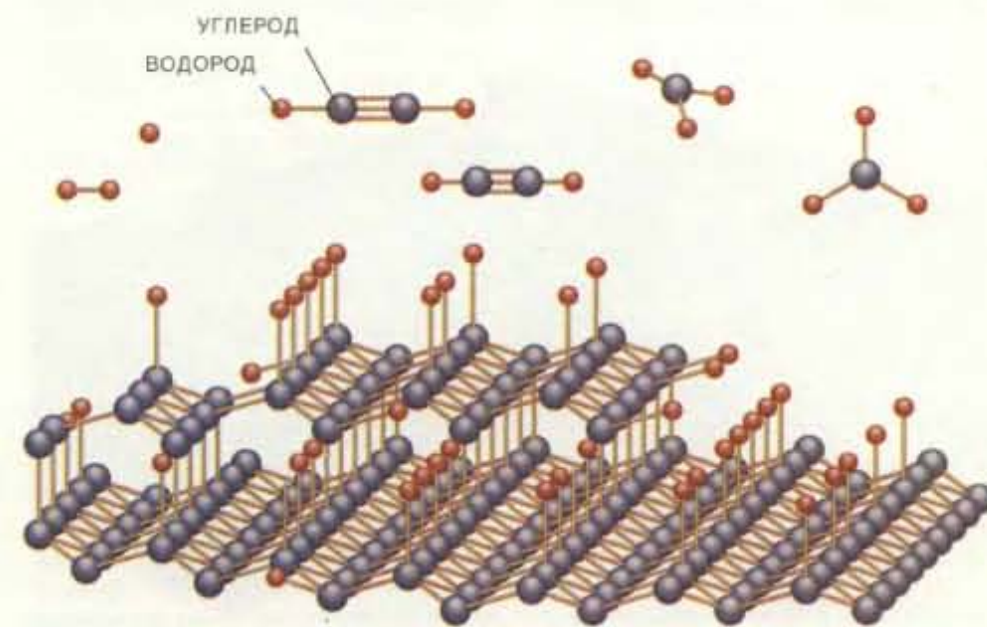
Затем на такую решетку осаждают слой алмаза толщиной 250 мкм. На этом этапе образуется сплошная толстая пленка, удерживаемая самостоятельно после того, как находящаяся под ней подложка будет вытравлена. В этой пленке границы между зернами расположены под небольшим углом, поскольку зерна никогда не выстраиваются в один ряд, но считается, что эти границы не ухудшают электрических свойств пленки. Для многих практических целей пленки, содержащие такие границы, эквива-

лентны монокристаллическим подложкам.

Полученные с помощью этого метода алмазные подложки входят в число самых больших пленок, выращенных до сих пор; их диаметр достигает 25 мм, однако стандартное оборудование, используемое в производстве полупроводниковой продукции, требует круглых подложек диаметром 50 мм и более. Несмотря на то что выращивание пленок таких размеров, по-видимому, не связано с непреодолимыми трудностями, для их практического получения еще необходима некоторая экспериментальная работа.

НАЛИЧИЕ технологии, позволяющей получать алмазные пленки нужного размера и качества для изготовления электронных схем, не решает всех проблем — этим пленкам необходимо придать определенную проводимость. В совершенном кристалле алмаза каждый атом углерода связан с четырьмя другими с помощью валентных электронов внешних оболочек. Чтобы такой электрон стал свободным и смог передавать электрический ток, требуется энергия 5,5 эВ. Эта величина настолько большая, что при комнатной температуре в кристалле массой 1 г может образоваться не более одного-двух свободных электронов; такой материал можно использовать только как диэлектрик.

Если один из атомов углерода заменить другим атомом, у которого име-



ПОВЕРХНОСТЬ выращиваемого кристалла алмаза почти полностью покрывается атомами водорода (красные). Атомные связи между водородом и углеродом фиксируют положение атомов на поверхности, поэтому структура алмазной решетки стабилизируется. Когда молекулы простых углеводородов (показаны над поверхностью кристалла) осаждаются на алмазе, атомы углерода образуют химические связи и внедряются в алмаз.

ется пять валентных электронов, то этот дополнительный пятый электрон не будет сильно связан с атомом. Он может свободно перемещаться и поэтому переносить электрический ток; тогда алмаз становится проводником. И наоборот, если один из атомов углерода заменить атомом с тремя электронами, то образуется «дырка» — подвижный, но положительный элементарный заряд, существование которого обусловлено отсутствием электрона в том месте, где ему следовало бы быть. Проводимость, возникающая благодаря наличию лишнего электрона, называется проводимостью *n*-типа, а та, что образуется в результате появления дырок, — проводимостью *p*-типа.

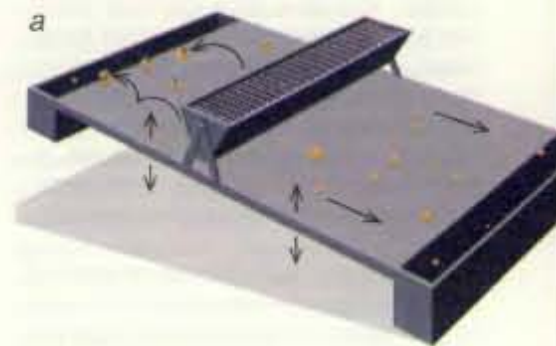
Бор, если им допировать алмаз, является подходящим элементом для придания алмазу проводимости *p*-типа. У бора на внешней оболочке три электрона, т. е. на один меньше, чем требуется для образования прочных связей в кристаллической структуре углерода. Кроме того, в периодической таблице элементов бор находится рядом с углеродом, и поэтому его атомы достаточно малы, чтобы их можно было без особого труда встроить в плотную кристаллическую решетку алмаза.

Допирование алмаза бором, однако, не очень эффективно. Чтобы сместить дырку из зоны вблизи атома бора в кристаллическую решетку алмаза, где она может выполнять роль свободного заряда, требуется энергия 0,36 эВ. Это примерно в 10 раз больше той тепловой энергии, которой обла-

дают атомы в кристаллической решетке алмаза. В результате менее 1% атомов бора в алмазе образуют дырки, обуславливающие его полупроводниковые свойства. Если допированный бором алмаз нагреть и тем самым увеличить его тепловую энергию, то большее число дырок «оторвется» от атомов бора и проводимость материала соответственно повысится.

В отличие от многих полупроводников алмаз более устойчиво работает при высоких температурах — в пределах от 100 до 500°C. Поведение алмаза в этих условиях сильно отличается от поведения кремния, в котором примесь бора продуцирует слабо связанные дырки, большинство из которых может свободно двигаться при комнатной температуре. Только в условиях очень низких температур при охлаждении жидким гелием сопротивление материала возрастает, поскольку связь дырок с атомами бора становится достаточно прочной. (При высоких температурах многие связанные электроны кремния, наоборот, становятся настолько подвижными, что управлять его проводимостью уже невозможно.)

Несмотря на то что алмаз обладает большим удельным сопротивлением, чем кремний, допированный в такой же степени бором, близкие размеры атомов бора и углерода создают возможность внедрить в кристаллическую решетку алмаза значительно большее число атомов бора, чем в какой-нибудь другой полупроводник. Более высокая концентрация допирующих атомов в какой-то степени компенсирует высокую энергию связи отдельной дырки. Действительно, допированный алмаз может проводить электрический ток почти так же, как и кремний.



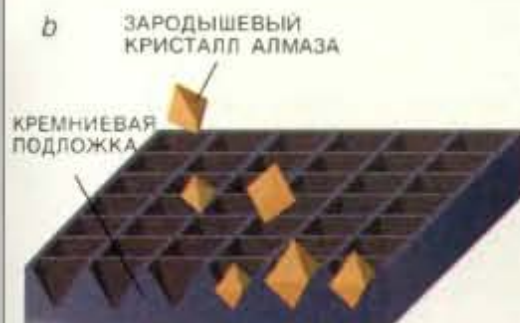
ОСАЖДЕНИЕ больших и практически бездефектных алмазных пленок начинается на зародышевых кристаллах. Эти кристаллы отбираются по размеру и форме с помощью специальных сит и вибростала (а). На-

пенсировать высокую энергию связи отдельной дырки. Действительно, допированный алмаз может проводить электрический ток почти так же, как и кремний.

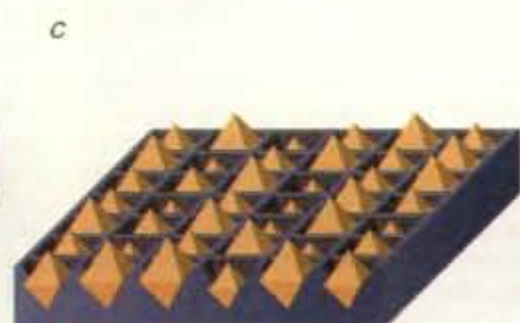
При допировании алмаза элементами *n*-типа возникает более сложная проблема. В качестве такого элемента лучше всего, казалось бы, подходит азот, поскольку он имеет на внешней оболочке пять электронов и в периодической таблице расположен рядом с углеродом. Кроме того, атомы азота малы по размеру и легко растворяются в алмазе. Однако энергия связи каждого дополнительного электрона с атомом азота равна примерно 1,7 эВ. При комнатной температуре очень малая часть этих дополнительных электронов является свободной и может беспрепятственно двигаться по кристаллу. По этим причинам азот нельзя считать эффективным допирующим элементом *n*-типа.

Фосфор также имеет пять электронов на внешней оболочке, поэтому его можно считать следующим кандидатом на использование в качестве допирующего элемента. Небольшое число экспериментов показало, что включение фосфора действительно создает в алмазе проводимость *n*-типа. Однако, поскольку атом фосфора по своим размерам намного больше атома углерода, растворить сколько-нибудь значительное его количество в алмазе становится невозможным. Таким образом, предпринятые до сих пор попытки допировать алмаз каким-нибудь элементом *n*-типа оказались неудачными.

В результате в большинстве полупроводниковых приборов на основе алмаза используется проводимость *p*-типа. Для изготовления транзистора, например, необходимо последовательно нанести слой с большой концентрацией атомов бора (по крайней



кремниевой подложке вытравливаются лунки пирамидального профиля (b). Когда подложка обрабатывается суспензией, содержащей зародышевые кристаллы, последние застревают в лунках так, что их грани образуют между собой угол в пределах нескольких долей градуса (с). При последующем осаждении алмаза образуется плен-



ка с малоугловыми границами между зернами, образующимися при росте каждого из зародышей (d). Эти границы не влияют на электронные свойства пленки. Пленки толщиной около 2,5 мкм были выращены таким методом, но авторы полагают, что можно выращивать пленки и большего размера.

мере несколько процентов общего числа атомов), слой со слабой степенью допирования и затем еще один слой с большой концентрацией примесного элемента. Верхний и нижний слои проводят ток в направлении к прибору или от него, и обычно к ним подсоединяются металлические проводники с малым сопротивлением. Ток, текущий через прибор, управляется изменением напряжения на затворе, роль которого выполняет средний слой с низкой концентрацией примеси.

Толщина и степень концентрации бора в среднем слое определяют величину максимального допустимого рабочего напряжения и токопроводящие свойства прибора. Чем толще эта пленка и чем ниже концентрация бора, тем больше рабочее напряжение прибора, но меньше его токопроводящая способность. Прибор, имеющий толщину 15 мкм и площадь 1 см² с концентрацией бора 10¹⁶ атомов на 1 см³ (что примерно составляет один атом бора на 20 млн. атомов углерода), способен выдержать до 3000 В. В режиме пропускания электрического тока его сопротивление равно примерно 0,1 Ом; при температуре 225°C сопротивление снижается до 0,01 Ом. Максимальный ток, который может протекать через прибор при напряжении 3000 В, равен 10 000 А.

Хотя толщину алмазной пленки и степень концентрации в ней бора можно задать с большой точностью, относительное содержание других примесей, таких, как азот, гораздо труднее поддается регулированию. Присутствие даже одного атома азота на миллиард атомов углерода может существенно ухудшить электропроводящие свойства алмазной пленки. В то же время столь малые концентрации почти не поддаются из-

мерению обычными методами анализа. Поэтому разработка методов, позволяющих устанавливать степень чистоты алмазных пленок, является первоочередной задачей будущих исследований в области синтеза алмазов, следующей по важности после разработки технологии получения больших кристаллов.

Трудно не только регулировать концентрацию примесей в алмазных пленках. Не менее сложная задача — их травление с помощью известных методов, применяемых в производстве полупроводниковой продукции. Рисунок схемы обычно формируется на кристалле с помощью газа, который, реагируя с подложкой, образует летучее соединение. Например, кислород вытравливает соединения, содержащие углерод, такие, как графит или пластики, образуя при этом газообразные монооксид или диоксид углерода. Кислород адсорбируется на поверхности подложки, затем лазерный луч или узко сфокусированный пучок атомов, ускоренных до больших скоростей, сообщает дополнительную энергию, необходимую для инициации реакции травления.

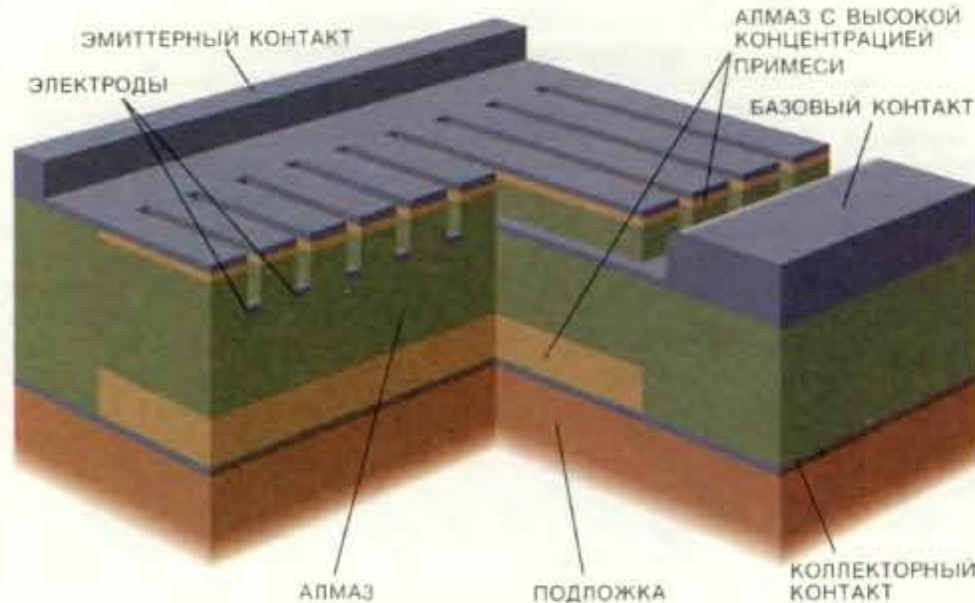
Кислород воздействует на алмаз на несколько порядков величины медленнее, чем на графит или на какое-либо иное соединение, содержащее углерод. Поверхность алмаза относительно невосприимчива к внешнему воздействию кислорода, возможно, потому, что очень небольшое число атомов кислорода адсорбируется на алмазе. Когда пучок быстро летящих атомов кислорода ударяется о поверхность, очень небольшое их число участвует непосредственно в процессе травления.

Вместо кислорода для травления алмаза используют диоксид азота, который легче адсорбируется. Травление азотом происходит более чем в

10 раз быстрее по сравнению с использованием кислорода. Кроме того, слой диоксида азота поглощает большую часть энергии падающего на него пучка атомов. Таким образом, кристалл алмаза не подвергается разрушению, которое часто происходит при травлении пучком быстрых атомов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ свойства алмаза исключительно благоприятны для его использования в производстве высоковольтных транзисторов. Алмаз разрушается в электрических полях напряженностью в 20—50 раз больших по сравнению с той, при которой в кремнии или арсениде галлия проводимость становится неуправляемой. Более высокий порог разрушающего напряжения означает, что максимально допустимые значения рабочего напряжения алмазных транзисторов будут в соответствующее число раз выше по сравнению с аналогичными показателями у обычных транзисторов из других материалов. Кроме того, мощный высоковольтный алмазный транзистор будет иметь меньшие габариты, чем у кремниевых или арсенид-галлиевых транзисторов такого же класса. Меньшие размеры алмазного прибора означают, что носители зарядов будут проходить более короткие расстояния и в то же время испытывать воздействие более сильного электрического поля. В результате он сможет срабатывать в 40—100 раз быстрее, чем аналогичный прибор из кремния или арсенида галлия.

Благодаря наличию в алмазе запрещенной зоны шириной 5,5 В (энергии, необходимой для высвобождения одного из связанных электронов) этот материал идеально подходит для использования в приборах, предназначенных для работы в условиях



АЛМАЗНЫЙ ТРАНЗИСТОР состоит из трех слоев (желтый, зеленый, желтый) с различной концентрацией бора. Верхний и нижний слои (эмиттер и коллектор) подводят и отводят ток от транзистора. Ток, текущий через средний слой (базу), регулируется напряжением, приложенным к встроенным в него металлическим электродам (синие).

высоких температур. Алмазные диоды Шотки, представляющие собой просто переход между металлом и алмазом, могут, например, работать при температурах свыше 700°C. Такой прибор можно было бы использовать в системах цифрового управления двигателями или аналогичных системах, работающих при высоких температурах. Аналогичные приборы, сделанные из кремния, у которого ширина запрещенной зоны всего 1,1 эВ, не могут работать при температурах выше 150°C.

Среди полупроводников алмаз является также необычным с точки зрения его способности образовывать высококачественные границы раздела с диоксидом кремния. В кремнии такие границы раздела являются ключевыми элементами в структуре полевых МОП-транзисторов, наиболее часто применяемых в производстве средств вычислительной техники. Конструктивно полевой МОП-транзистор представляет собой трехслойную структуру: полупроводник покрыт слоем диоксида кремния, а поверх него находится металлический электрод. Прикладываемое к этому электроду напряжение создает электрическое поле, пронизывающее изолирующий слой диоксида кремния и управляющее концентрацией подвижных носителей зарядов (как электронов, так и дырок) в расположенном под ним полупроводнике. Поскольку проводимость полупроводника прямо зависит от концентрации носителей зарядов, напряжение на электроде управляет током, текущим через транзистор.

Граница раздела между слоем диоксида кремния и большинством полупроводниковых материалов по своим качественным показателям не подходит для полевых МОП-транзисторов. Когда к электроду на диоксиде кремния прикладывается напряжение, неподвижные заряды быстро собираются на границе раздела и нейтрализуют большую часть электрического поля. Такое поле уже не способно пронизывать полупроводник, и влияние приложенного напряжения на концентрацию носителей зарядов значительно ослабевает (или вовсе исчезает).

В настоящее время в нескольких научных лабораториях уже изготовлены алмазные полевые МОП-транзисторы. Структура полевого МОП-транзистора — одна из тех, которые наиболее часто используются в интегральных схемах. Однако более важным является то обстоятельство, что алмазные полевые МОП-транзисторы работают намного эффективнее

по сравнению с любыми другими видами алмазных транзисторов. Если к электроду затвора приложить отрицательное напряжение, то в пограничной области между диоксидом кремния и алмазом появятся дополнительные дырки. Способность проводить электрический ток у такого прибора увеличивается более чем в 10 раз по сравнению с применением только допирования бором.

Способность алмаза образовывать хороший контакт с другими материалами в такой же степени касается и металлов. Когда только возник интерес к использованию алмаза для изготовления транзисторов, ученые опасались, что алмаз, как и многие другие полупроводниковые материалы с широкой запрещенной зоной, будет образовывать некачественные и обладающие большим сопротивлением контакты. Высокореистивные контакты свели бы на нет многие из потенциальных преимуществ алмазных транзисторов за счет ограниченной способности проводить электрический ток.

Сопротивление контакта между алмазом и металлом тем меньше, чем выше относительное содержание в алмазе допирующего элемента. Контакты с малым сопротивлением, не препятствующие протеканию тока через алмаз в обоих направлениях, можно сделать, если просто создать в алмазе самую высокую практически допустимую концентрацию допирующей примеси. Ученые из Центра океанических систем ВМС США и Университета шт. Северная Каролина продемонстрировали, что если концентрация бора достигает нескольких процентов, то образуемые контакты будут иметь меньшее сопротивление по сравнению с сопротивлением контактов при использовании кремния.

ХОТЯ теперь уже ясно, что на алмазе можно получать интегральные микросхемы, более вероятно, что в будущем этот материал может быть использован в приборах, больше похожих на вакуумные электронные лампы, чем на полупроводниковые транзисторы. Помимо многих весьма ценных электрических свойств алмаз обладает «врожденным» стабильным отрицательным электронным сродством (ОЭС). Электроны проводимости могут легко покинуть поверхность алмаза и перейти в вакуум при условии, что их заменят электроны из другого источника. Уход электронов с поверхности большинства материалов возможен только при достаточно высоких температурах (от 1000 до 3000°C) или сильных

электрических полях, напряженность которых превышает 10^7 В/см. Полупроводникам, таким, как кремний и арсенид галлия, можно придать ОЭС, если их покрыть тонким слоем цезия, однако достаточно самого малого количества влаги или кислорода, чтобы покрытие вступило с ним в реакцию и разрушило этот эффект.

Как только электроны покинут поверхность алмаза, они могут быть ускорены электрическим полем и сконцентрированы в пучок, направляемый для бомбардировки мишени (например, фосфора, который будет светиться с силой, пропорциональной энергии падающего на него потока электронов), или промодулированы внешним сигналом. Так называемые холодные алмазные катоды можно было бы использовать в небольших газоразрядных лампах, компьютерах или телевизорах в виде плоских панелей, а возможно, и в триодах субмикронных размеров, рабочие характеристики которых были бы намного лучше, чем у обычных полупроводниковых приборов.

Один из авторов этой статьи (Гейс) недавно изготовил такие катоды. Его экспериментальные образцы не «боятся» воды, кислорода и воздуха. Они работают при плотностях тока около 10 А/см², что только в 5 раз меньше, чем у горячих катодов в электронно-лучевых трубках или в электронных лампах мощных усилителей радио- и телепередатчиков.

Благодаря тому что ни подогрев, ни чрезмерное напряжение не требуются для того, чтобы электроны излучались с алмазных катодов, содержащие их вакуумные электронные приборы не подвержены влиянию факторов, которые сокращают срок службы обычных катодов. Отметим только, что единственно чем практически ограничивается токопроводящая способность алмазного катода, так это сопротивлением проводящей подложки, которая является «поставщиком» электронов. Теоретически эти приборы могут вполне надежно работать при плотностях тока более 1000 А/см².

При таких токах они могли бы стать основой для сверхминиатюрных вакуумных приборов, которые обладали бы большей мощностью и работали бы при более высоких частотах, чем даже алмазные транзисторы. Как ни странно, этот материал высокой чистоты, используемый в микроэлектронике, может привести к возрождению вакуумных электронных ламп, которые более 30 лет назад были вытеснены полупроводниковыми транзисторами.

Наука и общество

Удачная распродажа со склада в Нью-Мексико

ЕСЛИ память не изменяет Эдварду Гротусу, то, как он утверждает, графитовые сферы 6 футов в диаметре красуются сейчас на дворе чьего-то дома в Санта-Фе. «Они были великолепны — из чистого графита, с чем-то там в середине, — вспоминает он. — Я всех расспрашивал в лабораториях, выяснял, для чего же они делали эти штуки. Так и не выяснил».

Ничего удивительного. Лаборатория — не что иное, как неперемнная принадлежность Нью-Мексико: Лос-Аламосская национальная лаборатория, «колыбель» Манхэттанского проекта и первого в мире ядерного оружия. На протяжении уже более 20 лет Гротус является одним из наиболее заядлых скупщиков технологического «старья», оставшегося от засекреченных установок. Он же в свою очередь предлагает «отборные» куски этих «излишков» прочим желающим со своего склада «металлолома» — иначе компании Los Alamos Sales. «То и дело слышишь всякие ужасные сообщения насчет отходов, — задумчиво бормочет Гротус. — Компания Los Alamos Sales, к ее чести, открыла доступ широкой публике ко множеству таких вещей».

Избавляться от устаревшего оборудования — не такая уж мелкая задача, особенно в месте, самой судьбой предназначенном находиться «на лезвии ножа». С самых первых дней существования лаборатории ее руководители пробовали повторно использовать старое оборудование — сначала предлагая его другим государственным организациям и научно-исследовательским институтам, а затем — пытаясь продать его населению со скидкой (весьма существенной). Металлический канцелярский стол, например, мог пойти за 15 долл.

В результате продажа со склада стала знаменитой в местных кругах. «Сюда каждую неделю приходит около 125 местных жителей», — говорит Фрэнк Морбилло, скульптор из Shidoni Foundry and Galleries, что в пяти милях к северу от Санта-Фе. По вторникам в полдень будущие покупатели занимают места вокруг огороженных канатами площадок. После краткой лекции по технике безопасности «начальник» склада запускает толпу. «Он слишком много разговаривает. Надо лишь: «На старт, внимание, марш!» — шутит Морбилло.

Само собой разумеется, что радиоактивные, опасные и засекреченные материалы исключаются из продажи.

Однако что-то другое, например осциллографы, компьютеры, передвижные офисы и конторские стулья, может попасть в частное владение. С декабря прошлого года компания Los Alamos Sales поставяет дорогостоящие предметы на аукционную продажу «Бенгли» в Альбукерке. Менее привлекательными вещами компания продолжает торговать сама.

В течение долгих лет многие карьеры делались на захвате «железок» из «отходов» Лос-Аламосской лаборатории. Тони Прайс, например, потратил последние 28 лет, «лепя» скульптуры и маски из кусков оставшегося металла. Большинство его работ в настоящее время экспонируется на экспериментальной выставочной площадке «Биосфера 2» неподалеку от Туссона (шт. Аризона). «В прежние времена многие из таких предметов, как корпуса водородных бомб, издавали великолепные звуки, когда по ним ударяли, — вспоминает Прайс. — Сейчас такие вещи редко попадают, однако у меня кое-что еще осталось».

Гротус, который проработал 20 лет в Лос-Аламосской лаборатории инженером-механиком (до того, как он ушел оттуда в знак протеста против вьетнамской войны), говорит, что его пытались подвергнуть дискриминации за его выбор. Когда администрация Рейгана урезала финансирование научных исследований по солнечной энергии, он утащил к себе части ставшей ненужной мегаваттной солнечной батареи. Регулярно появлялись «на свалке» остатки ныне ставших антиквариатом суперкомпьютеров Крея. «Целые узлы дисководов выбрасывались, — гово-

рит Гротус. — Разумеется, из всего того, что мы когда-либо продавали, самое замечательное — это записывающие головки». Его наиболее выгодной покупкой: 120 т труб из нержавеющей стали, которые он в свою очередь удачно продал чикагской компании Chicago Steel.

Такой вид торгово-финансовой деятельности оказался удобным также и для самой Лос-Аламосской лаборатории. Когда около семи лет назад она демонтировала свою установку «Антарес», работавшую в рамках программы по лазерному ядерному синтезу, Гротус приобрел у нее более двух десятков резервуаров из нержавеющей стали длиной в шесть футов. Примерно год назад руководителям лаборатории снова понадобилось некоторое количество таких резервуаров, и, скрепя сердцем, они выкупили назад несколько штук. «Они сумасшедшие — им приходится мне же и платить, — смеется Гротус. — Эксперименты начинаются и завершаются, а у лаборатории даже нет места, чтобы хранить весь этот хлам». (Тем не менее он передал лаборатории обратно в дар резервуар, носящий название «господин Глаз», который, по словам лос-аламосских специалистов, «был глазом, впервые увидевшим нейтрино».)

Однако при всем том Гротус считает, что ему мешают развернуться. Поскольку его торговая площадка завалена множеством предметов, соседние собираются подавать на него в суд. «За последний месяц, — говорит он, — я навелывался на лос-аламосский склад «утильсырья» всего один раз. Я уже много чего припрятал на черные дни. Теперь только пытаюсь умиротворить соседей».

Элизабет Коркоран



ЧАСТИ ОТ УСТАНОВКИ «АНТАРЕС» для лазерного ядерного синтеза входят в число товаров, которыми торгует Эдвард Гротус. (Фото Чела Бисона.)

Гоминиды-падальщики и эволюция человека

Хотя употребление мяса сыграло большую роль в формировании зубов, мозга и поведения человека, а также в развитии технологии изготовления каменных орудий, наши древнейшие предки, вероятно, в большей степени были падальщиками, чем охотниками

РОБЕРТ ДЖ. БЛЮМЕНШАЙН, ДЖОН А. КАВАЛЛО

«ЧЕЛОВЕК-охотник» — фраза, которая «звучит». Всякий предпочел бы выглядеть львом, а не стервятником. Охота представляется более благородным и на первый взгляд более выгодным делом, чем подбирание падали. Что мо-

жет лучше свидетельствовать о нашем «эволюционном успехе», как не картина, на которой ранние гоминиды, древнейшие предки человека, предстают сильными и отважными охотниками? Многие антропологи согласны с тем, что употребление в

пищу мяса крупных животных способствовало формированию физических и социальных условий, приведших к появлению характерных особенностей, отличающих человека от обезьяны. Но добывалось ли это мясо охотой? Может быть, это были

останки животных, павших или ставших добычей хищников? Эти вопросы столь же важны, как и любые другие, возникающие в исследованиях эволюции человека, поскольку они связаны с определением самой природы человека. К сожалению, ответ, который дает на эти вопросы теория «Человек-охотник», основан более на предрассудках, чем на ископаемых находках и экологических аспектах добывания пищи.

На наш взгляд, вопросу о подбирании падали гоминидами уделялось мало внимания потому, что многие антропологи склонны проецировать в прошлое современные представления о том или ином образе жизни. Картины, охватывающую различные стороны жизни ранних гоминидов и скрытую прошлым, они подменяют представлениями об образе жизни охотников-собираателей, человекообразных обезьян и плотоядных животных — практика, лишаящая гоминидов самой способности к адаптации. Сторонники теории «Человек-охотник»

также ставят гоминидов над другими живыми существами, как если бы наших предков не касались «осложнения» в отношениях между хищниками и их потенциальными жертвами. Во всех этих случаях предполагается, что для ранних гоминидов охота была выгодным, обычным и безопасным делом, тогда как подбирание падали — занятием, не приносящим достаточного количества пищи, нерегулярным и к тому же опасным.

В своем исследовании мы пришли к противоположным выводам. Подбирание падали, возможно, было более распространенным способом добывания пищи, чем охота 2 млн. лет назад, на границе между плиоценом и плейстоценом. Изготовление каменных орудий из отщепов, практика забоя крупных животных и эволюция *Homo*, отличавшегося более крупным мозгом, — всему этому есть физические свидетельства, относящиеся к тому времени. Поскольку значительная часть этих свидетельств обнаружена в Восточной Африке, в частнос-

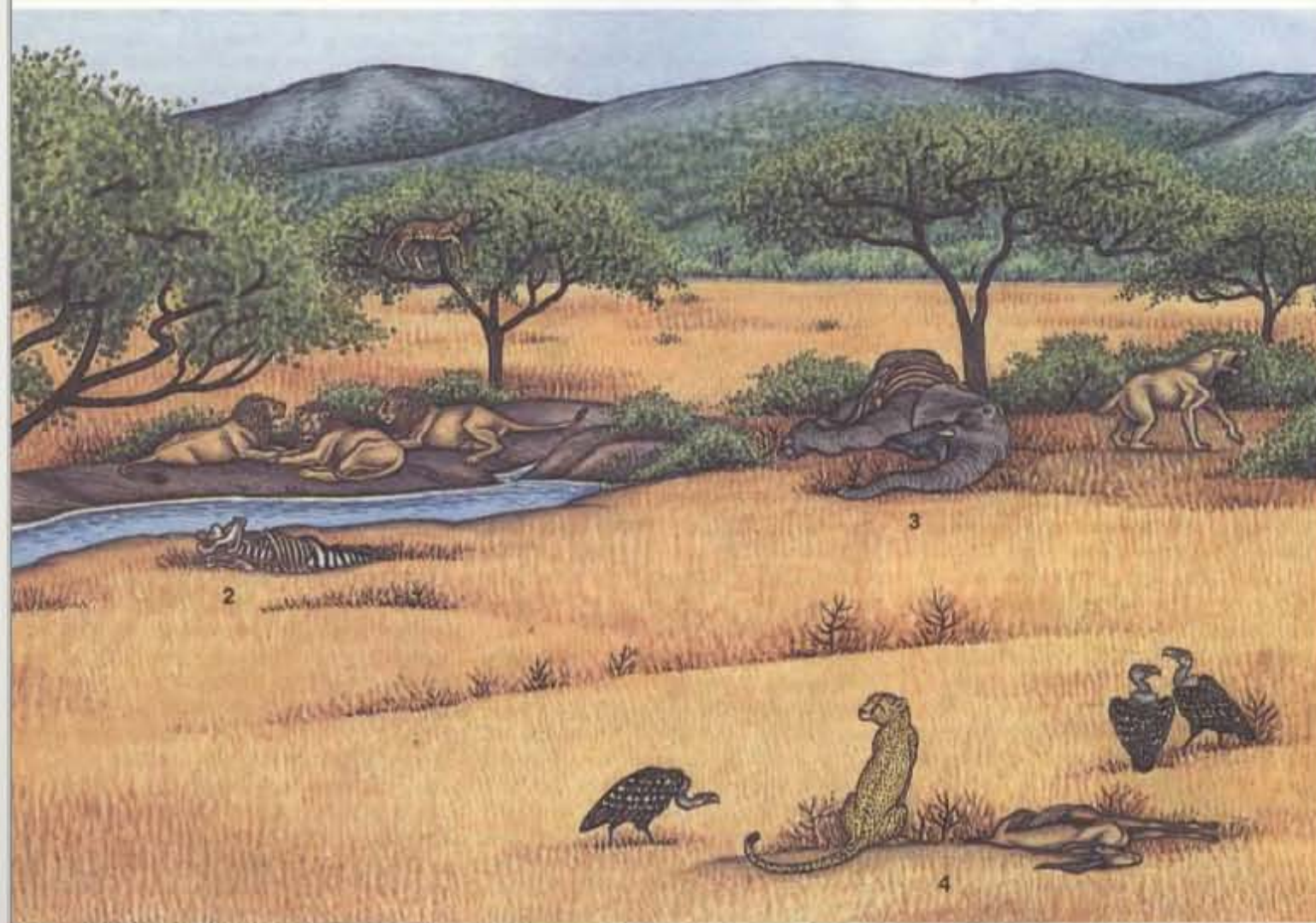
ти в ущелье Олдувай в Танзании, мы попытались выяснить, можно ли расшифровать свидетельства о древних способах добывания пищи, сохранившиеся в близлежащих заповедниках: Национальном парке Серенгети в Танзании и в заповедной зоне Нгоронгоро. Мы также попытались объективно оценить господствующее в этом районе представление о том, что подбирание падали обладает большими преимуществами по сравнению с охотой.

В течение 20 месяцев мы наблюдали, как хищники, а также животные, питающиеся падалью, добывают себе мясо и что они потом делают с остающимися костями. Таким образом, наша полевая работа объединяла в себе этологию и тафономию — изучение того, как «последующие события» изменяли останки животного, что находило отражение в ископаемых находках. Кроме того, мы объединили полученные результаты с палеонтологическими и археологическими данными, свидетельствующи-



ПОДБИРАНИЕ ПАДАЛИ представляло собой стратегию поиска пищи гоминидами, успех которой во многом зависел от сезона и особенностей местности. В рощах близ водоема эта стратегия приносила наибольшие результаты,

поскольку деревья служили гоминидам убежищем и скрывали туши животных от ястребов. Добычу леопардов (1) можно было найти, вероятно, круглый год, добычу львов (2) — главным образом в сухой сезон. Саблезубые тигры



оставляли туши крупных животных (3), которые можно было найти в подобной местности в любой сезон. Останки животных, ставших добычей львов, гепардов (4) и гиен (5), на открытой местности были менее привлекательны для

гоминидов, поскольку их там опережали ястребы и гиены и они не могли спрятаться от крупных хищников. Туши животных, утонувших (6) или павших от голода (7), представляли собой дополнительный источник пищи.



ЧТОБЫ ПИТАТЬСЯ ПАДАЛЬЮ на открытой местности, необходимо быстро передвигаться и обладать большой силой, что было за пределами возможностей гоминидов. Эти

пятнистые гиены добрались до останков животного, ставшего добычей льва, до того, как останки разодрали ястребы; если лев вернется, гиены смогут убежать от него.

ми о поведении протогоминидов. Такой подход просеивает в прошлое только те аспекты экологии и современного поведения животных, которые могут быть «запечатлены» в ископаемых остатках. Тем самым исключается возможность «наложения» на получаемые результаты образа жизни современных видов.

То обстоятельство, что в антропологии ничто не способно заменить такие актуалистические исследования, можно продемонстрировать на примере зоологии, в частности, тем, что стало известно зоологам о поведении гиены (символа животного-трупоеда) и льва (символа хищника). Всего 30 лет назад мало кому было известно, что каждое плотоядное животное является как охотником, как и падальщиком. Если предубеждения способны до такой степени искажать истинную картину жизни современных плотоядных животных, то насколько осторожными должны быть ученые, которые пытаются реконструировать систему жизнеобеспечения, характерную для вымерших гоминидов.

Теория «Человек-охотник» никогда не ограничивалась ископаемыми находками. Чарльз Дарвин первый представил охоту как «поведенческий катализатор», который, будучи задействован в механизме естественного отбора, способствовал увеличению мозга, применению орудий, уменьшению размеров клыков, развитию способность передвижения на двух ногах, что

привело к разделению ветвей человека и обезьяны. Свою гипотезу он изложил в работе «Происхождение человека и половой отбор» (1871) до того, как были найдены какие-либо ископаемые остатки, относящиеся ко времени, предшествующему появлению неандертальцев. Когда в первых декадах нынешнего столетия были добыты новые древние образцы, исследователи включили их напрямую в схему Дарвина. Раймонд Дарт, открывший род *Australopithecus*, в течение 30 лет пытался доказать, что этот гоминид, возможно, охотился на животных, чьи кости часто находят вместе с его костями. Чтобы обойти проблему отсутствия в этих местах каменных орудий, Дарт предположил, что оружие и орудия труда у *Australopithecus* были «остеодонтокератическими», т.е. изготовленными из костей, зубов и рогов животных.

Такая интерпретация получила поддержку в трудах многих исследователей, изображавших предков человека как «обезьян-убийц». Однако она была поставлена под сомнение после критического анализа, выполненного К. Брейном из Музея Трансвааля (Южная Африка) — одним из первых тафономистов. Он показал, что австралопитhecины не имеют никакого отношения к костям животных, обнаруженных рядом с их скелетами. Судя по результатам исследований, останки как гоминидов, так и копытных животных оказались в одном месте вследствие того, что леопарды,

охотившиеся на этих животных, сбрасывали вниз их кости с деревьев, на которых они обычно питались. Тем не менее теория «Человек-охотник» не утратила своей привлекательности, правда, теперь ее стали применять к более поздней стадии эволюционной теории, которая началась с появления *Homo habilis*, отличавшегося прежде всего более крупным мозгом.

А РГУМЕНТЫ в защиту этой теории изложены наиболее полно в статьях, вошедших в сборник «Человек-охотник» (1968), составленный Ричардом Ли и Ирвеном Деворе. Авторами этих статей начертан следующий сценарий. Прошлякая в саванну, протогоминиды дополняли к своей привычной вегетарианской пище все в большем количестве мясо убитых ими животных. Охота развиваласообразительность и ловкость, поэтому отбор работал в направлении более крупного мозга и более ловких рук. Эти качества увеличили технологические возможности, повысив роль мозга. Охота как способ добычи пищи стала движущей силой социальной эволюции и эволюции мозга.

Эта теория оставалась распространенной до конца 70-х годов, когда была опубликована известная статья ныне покойного Глинна Айзака, археолога из Калифорнийского университета в Беркли. В ней автор сместил акцент с добычи мяса на его разделение (см. Glynn Isaac. The Food-Sharing

Behavior of Protohuman Hominids, "Scientific American", April 1978). Айзак показал, что у ранних гоминидов существовали «основы дома» — поведенческая инновация, которая, по мнению автора, предполагала разделение труда между полами — другая инновация. Чтобы добывать больше пищи, пользуясь «всеядной стратегией», мужчины уходили далеко от жилища на поиски останков животных, ставших добычей хищников, или охотились на дичь, а женщины собирали фрукты или клубни растений рядом с жильем, потом добыча делилась между семьями. В конце концов, такое альтруистическое поведение и социальная кооперация стали способствовать развитию мышления, языка и культуры.

В 1981 г. Льюис Р. Бинфорд, ныне работающий в Южном методистском университете, провел дальнейшие исследования, посвященные этому вопросу. Сделав повторный тафономический анализ результатов, полученных Мэри Лики при исследовании костей, обнаруженных в ущелье Олдувай, Бинфорд пришел к выводу, что ни охота, ни дележ пищи не являются «порождением времени» *Homo sapiens*. Гоминиды попросту собирали обглоданные кости, оставленные более ловкими плотоядными животными, и, расколов их, извлекали костный мозг. По мнению Бинфорда, подбирание падали не обеспечивало избыточного количества мяса, необходимого для того, чтобы его всегда можно было делить. Напротив, питание протогоминидов напоминало преимущественно вегетарианский рацион современных обезьян.

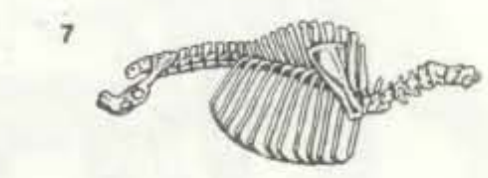
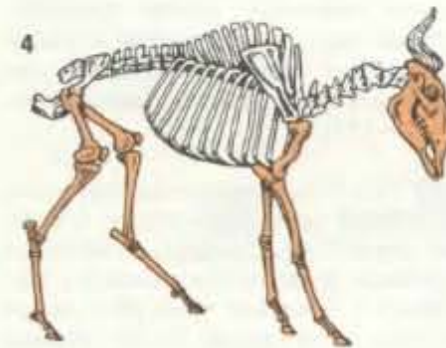
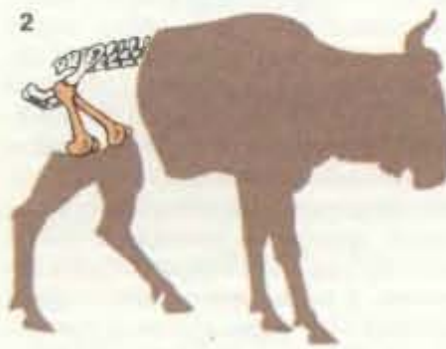
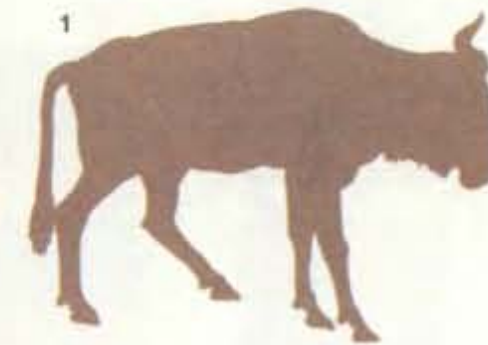
Более того, по мнению Бинфорда, даже первые *Homo sapiens*, жившие в Южной Африке, и современные им неандертальцы, жившие на территории Европы, питались мясом крупных животных, которые пали или стали добычей хищников, и охотились лишь на мелких животных. Таким образом, Бинфорд также сохранил гипотезу «Человек-охотник», отнес ее к более позднему периоду — в пределах 100 тыс. лет назад. Его реконструкция допускает, что подбирание падали привнесло скудные результаты и что охота и связанная с ней практика дележа пищи были движущей эволюционной силой, хотя и очень поздно вступившей в действие.

Мы начали свой критический анализ этого подхода с оценки того, насколько хорошими охотниками могли быть первые гоминиды. «Физические данные» *Australopithecus* и первых *Homo* не отвечали такому роду деятельности. Рост самок составлял примерно 120 см, а самцов — не пре-

вышал 150 см. Первые весили около 35 кг, вторые — примерно 50 кг. Судя по их длинным рукам, они все еще находили убежище на деревьях. Причем скрываться на деревьях гоминидам приходилось часто, поскольку им угрожали такие ловкие хищники, как львы, саблезубые тигры и гиены. Что касается их орудий, то даже *Homo* пользовались очень примитивным на-

бором грубых скребков и необработанных отбойников. Оружия как такового, по всей видимости, не существовало.

Вместе с тем, согласно археологическим данным, эти небольшие приматы «посягали» на нишу крупных плотоядных животных. В ущелье Олдувай и других местах обнаружены простые каменные артефакты, соот-



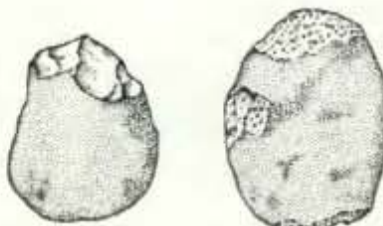
СТАДИИ ПОЕДАНИЯ ПАДАЛЬЩИКАМИ туши копытного животного. Все, что могло употребляться в пищу после стадии 3, было доступно лишь гиенам и гоминидам. Первые использовали свои крепкие зубы, а вторые — камень, чтобы раздробить кости и череп и извлечь мозг. Генри Т. Банн из Висконсинского университета в Мадисоне, проводивший исследования местоположения *FLK Zinjanthropus* в Восточной Африке, возраст которого составляет примерно 2 млн лет, обнаружил, что в этом местонахождении преобладают кости черепа и конечностей. Это говорит о том, что гоминиды, вероятно, подбирали останки животных в стадии 4.

Разделка туш

Для разделки туш животных использовались кремневые отщепы (вверху), с помощью которых снимали шкуру и удаляли мягкие ткани, а также отбойники, которыми дробили кости. Такие орудия классифицируются как олдувайские, поскольку они были обнаружены в ранних слоях ущелья Олдувай. Более поздняя, ашельская технология, представлена здесь хорошо обработанным ручным рубилом (внизу).



ПРОСТЫЕ ОТЩЕПЫ



ОТБОЙНИК МОЛОТОК



РУЧНОЕ РУБИЛО

носящиеся с окаменелыми фрагментами костей разных животных, как совсем небольших (таких, как газели), так и очень крупных (таких, как слоны). На поверхности некоторых из этих костей оставлены следы зубов плотоядных животных. Часть этих и других костей несет на себе также следы от каменных орудий, которыми от костей отделяли мясо. Многие кости расколоты и имеют следы ударов камнем, с помощью которого доставали костный мозг. Могли ли наши далекие предки, оставившие такие следы, убивать этих быстроногих или других, исполинских размеров животных? Мы считаем, что вопрос о роли подбирания падали заслуживает более пристального внимания.

Сторонники теории «Человек-охотник» утверждают, что гоминидам, добывавшим пищу в дневное время, было бы трудно обнаруживать останки животных, ставших добычей хищников, которые во время охоты покрывали большие расстояния, а то, на что могли рассчитывать гоминиды, поедали гиены, единственное животное, способное зубами дробить кость, чтобы добраться до костного мозга. Однако эти аргументы не учитывают две возможности, которые мы наблюдали в Танзании: возможность обнаружения останков животных, ставших добычей крупных кошачьих в рощах вблизи водоемов, а также возможность обнаружения туш очень крупных павших или утонувших животных. В связи с этим гоминиды могли претендовать на нишу, недоступную в такой же степени другим животным, питавшимся падалью (см. рисунок на с. 176—177).

ЛЕСА вблизи водоемов, вероятно, были наиболее удобным местом для двуногих, частично обитавших на деревьях, поскольку служили им убежищем и скрывали туши убитых животных от ястребов. Туши крупных (размером с зебру) копытных животных удавалось находить в этих местах главным образом в засушливый период, когда львы, объев мякоть, оставляли свою добычу. Добычей же леопардов были небольшие копытные животные, на которых они охотились круглый год. Туши этих животных были защищены лучше всего, поскольку обычно леопарды хранили их на деревьях. Два миллиона лет назад саблезубые тигры, вероятно, «предоставляли» гоминидам третью возможность, и также в лесах близ водоемов. Эти вымершие хищники охотились на очень крупных животных, и после них в тушах оставалось много мяса.

МЫ ПРЕДПОЛАГАЕМ, что подбирание падали играло наиболее важную роль в засушливый период, когда растительная пища была очень скудной, а возможности обнаружения останков различных животных были наименее благоприятными. Район охоты хищников (за исключением леопардов) во влажный период не имеет предсказуемого «пространственного фокуса» близ водоема; наоборот, хищники охотились на более обширной и более открытой территории. Останки животных в этом случае быстро находят и поедают гиены. Поскольку трупоедение, вероятно, способствовало тому, что плотоядность и травоядность стали сезонно дополняющими друг друга стратегиями, мы не считаем в отличие от сторонников теории «Человек-охотник», что добыча мяса была основой адаптации гоминидов. Как показывают дендральные данные, гоминиды всегда были всеядными. Одни лишь находки каменных орудий и костей животных вовсе не свидетельствуют о том, что мясо было основной пищей.

Тем не менее подбирание падали приводило к тому, что сухой сезон становился периодом изобилия. Голод и хищники намного увеличивали в этот период возможность быстро найти тушу животного. Даже если от добычи львов оставались лишь кости и головной мозг, то даже это намного превышало суточную потребность взрослого человека в калориях при получасовой затрате труда на разбиение костей камнем. Столь высокая «энергетическая отдача» пищи не могла бы быть достигнута путем выращивания съедобных растений. Если бы гоминидам пришлось выбирать способ добывания пищи исходя из энергетических затрат, то выращиванию растений они всегда бы предпочли добычу останков животных в любом случае, когда это было бы возможно. Такое предпочтение было бы наиболее заметным в разгар засухи, когда выращивание растений оказывается почти невозможным, а останки животных, убитых крупными кошачьими, можно было найти сравнительно легко. Подбирание падали имело и экономические преимущества перед охотой: на то, чтобы достать чью-то добычу с дерева или просто подобрать ее с земли, требовалось затрачивать меньше энергии, поскольку не нужно было преследовать животное. Подбирание падали сопряжено также с меньшим риском, чем охота. Конечно, любое мясо, которое привлекает гоминидов, может также привлекать львов. Однако, как показывают наши наблюдения, крупные плотоядные животные часто остав-

ляют некоторые туши животных на длительное время. Поэтому место, где лежит такая туша, в этот период становится относительно безопасным.

Наиболее же безопасными являются места в лесу близ водоема. Мы установили, что гиены обнаруживают здесь кости животных, объединенные львами, лишь через день — довольно хороший запас времени для гоминида, способного воспользоваться камнем, чтобы достать из костей мозг. С еще меньшим риском можно было добывать хранившиеся на деревьях останки животных, ставших добычей леопардов, особенно когда его запас состоял из туш нескольких животных. Леопарды обычно живут в одиночку, и иногда даже бабуин или шимпанзе могут отпугнуть это животное. Кроме того, леопарды часто оставляют свою добычу (иногда даже не прикоснувшись к ней) на 8—12 часов в течение дня.

Что касается открытых местностей, то, возможно, существовавший там риск перевешивал преимущества питания останками животных, несмотря на то что можно было отогнать гепарда или шакала от их добычи, использовать то, что оставалось после львов во влажные периоды или питаться мясом животных, павших во время засухи. Основанием для такого вывода является то обстоятельство, что в этих районах росло мало деревьев, что лишало убежища гоминидов, адаптированных к жизни на деревьях. Однако это обстоятельство было по крайней мере столь же неблагоприятным и для охоты. Крупные травоядные животные не были беззащитными, но даже если одного из них удавалось убить, то на открытой местности добыча быстро привлекала к себе животных, питающихся падалью. Многие из них превосходили в ловкости и силе двуногих, вооруженных лишь камнем.

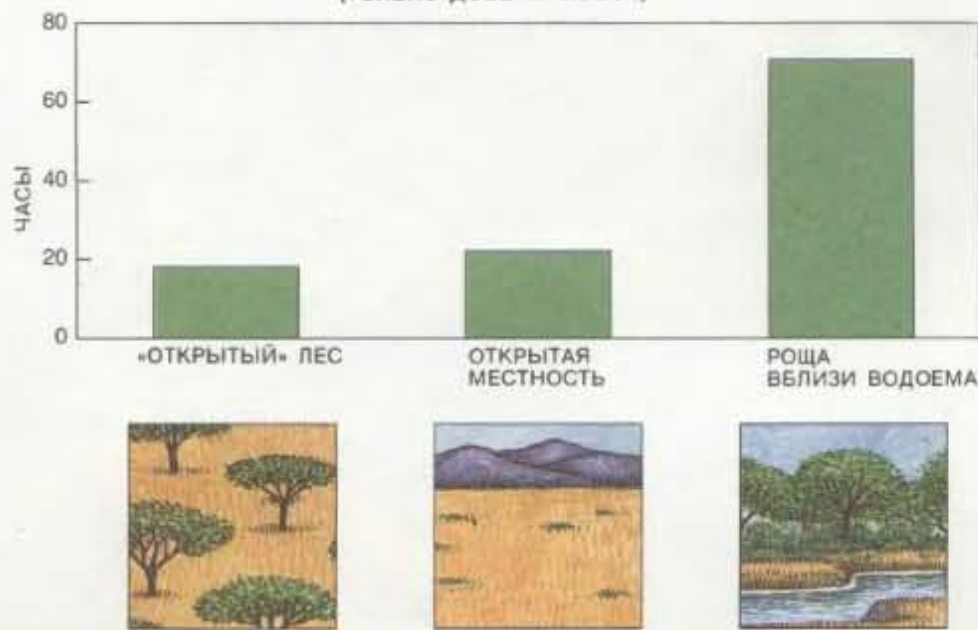
Сторонники теории «Человек-охотник» могут также возразить, что останки животных, ставших добычей хищников, а также туши павших животных слишком быстро подвергаются разложению по сравнению с мясом убитой дичи. В Серенгети мы наблюдали, что лишь у небольшого числа туш животных, оставленных лежать на земле, мясо было годное к употреблению по прошествии 48 часов, когда начинается процесс гниения. Но даже к этому времени большая часть все еще съедобных тканей находится под защитой кожного покрова или заключена в костях, что препятствует проникновению насекомых и других переносчиков инфекции. Даже мясо в тушах животных, умер-

ших естественной смертью, обычно не содержит опасных паразитов, поскольку чаще всего эти животные умирают не от болезни, а от голода.

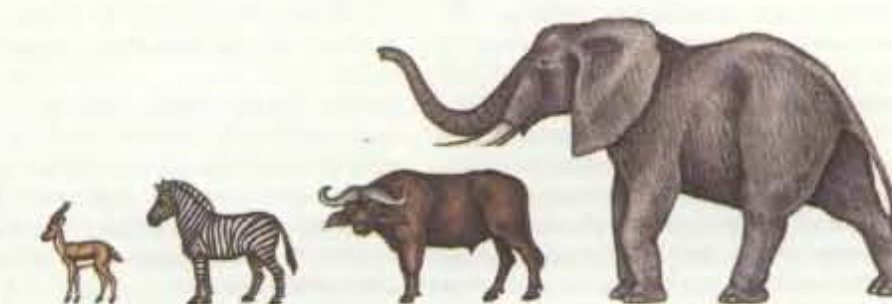
Выдвигаются также аргументы,

что подбиранием падали невозможно было обеспечить организм достаточным количеством питательных веществ. По мнению Джона Д. Спета из Мичиганского университета, в мя-

«ПЕРИОД СОХРАННОСТИ» ТУШ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕСТНОСТИ (ТОЛЬКО ДОБЫЧА ЛЬВОВ)



«ПЕРИОД СОХРАННОСТИ» ТУШ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРА



ПЕРИОД ВРЕМЕНИ, в течение которого падальщики могут поживиться останками животного («период сохранности») в Серенгети, зависит от характера местности и от размеров животного, павшего или ставшего добычей хищников. Останки крупных животных на земле лежат дольше, чем останки мелких животных. Еще больший «период сохранности» имеют останки, которые леопарды хранят на деревьях. В рощах близ водоемов останки «сохраняются» дольше, чем на открытой местности.



ТУШИ ЖИВОТНЫХ, которые леопард хранит на дереве, были доступны только гоминидам. Поскольку запасы леопарда содержали как кости, так и мясо, они были наиболее

привлекательны для гоминидов, которые пользовались орудиями для разделки туш.

се животных, павших от голода, не хватало жиров и питание одним лишь этим мясом может привести к определенной болезни, вызванной голодом. (Лесные жители называют такую болезнь «заячьей лихорадкой», поскольку она случается, если питаться исключительно зайчатниной или каким-то другим столь же постным мясом.) Однако гоминиды всегда большую часть своих калорий получали, потребляя углеводы и масла растительного происхождения, кроме того, в засушливые периоды их рацион мог включать жиры, содержащиеся в мозге, который они извлекали из костей животных.

Какая стратегия поиска пищи более древняя — охота или подбирание падали? Ответы на этот вопрос давались с эволюционных позиций, причем каждое новое свидетельство отрицало прежнее представление. Охота считалась исключительно человеческим занятием до тех пор, пока Джейн Гудолл не обнаружила эту форму поведения у шимпанзе. Подбирание падали считалось ниже «достоинства» примата, пока исследователи не открыли, что шимпанзе и бабуины присваивают себе добычу гепардов и

леопардов. Подбирание падали рассматривалось как нечто чуждое человеческой природе до 1988 г., когда в ходе 20-летнего этнографического исследования были получены свидетельства, что народы Хадза и Сан, живущие к югу от Сахары, употребляют мясо павших животных, а также животных, ставших добычей хищников.

Самые ранние гоминиды, вероятно, питались падалью, а также ловили мелкую дичь, как это делают шимпанзе и бабуины. И только следующий их шаг был уникальным: они стали использовать орудия для разделки туш крупных животных, чего не могли делать другие приматы. Это обстоятельство опровергает представление о том, что такой способ добычи пищи, как подбирание падали, не способствовал развитию человеческих особенностей.

Результаты наших полевых исследований свидетельствуют о том, что подбирание падали было далеко не простым занятием для медлительных и не имевших острых клыков приматов. Чтобы быстро узнавать, где лежит туша животного, нам пришлось научиться распознавать различные

знаки, помогающие найти эту тушу в редколесье рядом с водоемом. Такими знаками может служить следующее: ранним утром ястреб летит к добыче кратчайшим путем на малой высоте; ястреба сидят не на кронах деревьев, а на ветвях, расположенных ближе к стволу; на деревьях можно заметить останки животных, ставших добычей леопарда; у основания дерева, на котором питается леопард, обычно валяются клочья шерсти копытных животных, а на стволе самого дерева видны следы когтей леопарда. Ночью у того места, где лежит туша животного, которого недавно задрал хищник, раздается громкий «хохот» гиен; зебра издает отчаянный крик, когда на нее нападает хищник — умеющий различать эти звуки знает, где поутру следует искать туши животных.

Высшие приматы составляют «мысленные карты» территорий, на которых они добывают пищу, и используют эти карты, чтобы прогнозировать, в каком месте созреют плоды в следующий раз. Гоминиды, вероятно, использовали подобный способ определения того, где наиболее вероятно можно обнаружить ту-

ши животных. Мы и сами обучились этому, правда с большим трудом. Каждый день мы следили за передвижениями хищников, отмечали, в какое время они охотятся и питаются, а также общую активность животных — потенциальных жертв хищников. Когда-то гоминиды, возможно, пользовались подобной информацией повседневно, чтобы избежать встречи с хищниками.

СОЦИАЛЬНЫЕ навыки у гоминидов вряд ли развивались бы, если бы этому процессу не способствовала также стратегия добывания пищи путем подбирания падали. Если предположить, что мяса, заключавшегося в туше животного, хватало лишь на одного гоминида, то дележ добычи становился невозможным, а сама эта стратегия, вероятно, породила бы соперничество среди гоминидов. Однако если результаты наших исследований верны, а мяса животных, ставших добычей крупных хищников, хватало гоминидам в избытке, то модель совместного добывания и дележа пищи, предложенная Айзеком, оказывается вполне применимой в данной ситуации. При этом социальные навыки могли достигать того уровня, где начинается разделение труда, а совместное добывание пищи осуществляется на базе общего дома. Можно было бы предположить, что наши предки обычно находили туши животных в одном месте, а камни, которыми они разделявали эти туши, — в другом. Применение орудий, найденных в другом месте, требовало глубокого уровня планирования, способности составлять «мысленные карты», а также социального сотрудничества.

Шимпанзе, обитающие в Западной Африке, — единственные среди приматов (не считая человека), обладают достаточно глубоким уровнем планирования, позволяющим им приносить каменные орудия к месту нахождения пищи: они приносят камни, служащие им молотом и наковальней, чтобы раскалывать твердые орехи кола. Однако они не переносят камни на очень большие расстояния (*Homo habilis* переносили камни на расстоянии до 10 км).

Технические навыки, необходимые для разделывания туш животных, отображены в древнейшем наборе каменных орудий, обнаруженных в ущелье Олдувай (см. рисунок на с. 180). Этот набор включает заостренные каменные отщепы для отделения мяса и расчленения костей, а также булыжники для дробления костей и черепов. Ни в этом комплексе, ни среди находок, относящихся к

ашельскому периоду (1,5 млн.—200 тыс. лет назад) и отличающихся большей сложностью, не обнаружено орудий, явно предназначенных для использования в качестве оружия.

Эти соображения привели нас к выводу, что олдувайские гоминиды-падальщики, возможно, освоили нишу, которой объясняется существование груд орудий и костей крупных млекопитающих, а также многие исключительно «человеческие» особенности, появление которых связывают с охотой. Подбирание падали поначалу, возможно, лишь дополняло стратегию поиска растительной пищи, причем здесь можно выделить несколько этапов.

Гоминиды, возможно, стали питаться мясом крупных животных задолго до появления *Homo*. Первыми включили в свой рацион эту пищу, вероятно, австралопитеки, когда они осваивали саванну и редколесье, которые стали занимать обширные территории примерно 6 млн. лет назад в результате глобального изменения климата. Эти открытые условия предоставляли большие возможности для подбирания падали, чем «закрытые» леса, в которых обитали предшественники гоминидов (в такой среде обезьяны живут и по сей день).

Самые ранние гоминиды, вероятно, встречали объединенные хищниками останки животных, когда искали себе растительную пищу в редколесье рядом с водоемом. Чтобы воспользоваться этим пищевым ресурсом, требовались всего-навсего необработанные булыжники, с помощью которых можно было раздробить кости и извлечь мозг. Возможно, существуют ископаемые свидетельства добычи этих богатых источников энергии и белка, которые до сих пор ускользали от археологов, поскольку в то время

еще не существовало каменных орудий из отщепов.

МОЖНО предположить, что гоминиды-падальщики начали вытеснять гиен, поскольку добывались первыми до останков животных, ставших добычей хищников. Определенным подтверждением этому может служить факт вымирания нескольких видов гиен примерно 2 млн. лет назад. Появление каменных орудий из отщепов около 2,5 млн. лет назад, возможно, позволило гоминидам «посягнуть» на новый компонент ниши крупных млекопитающих. Теперь они могли не только извлекать мозг из костей, но и отделять от них мясо. Отщепы в руках гоминидов заменяли плотоядные зубы хищников. С помощью них они могли разделять добычу леспарда, которую он хранил на дереве. Кроме того, с помощью этих орудий они могли разделять туши гораздо более крупных животных, ставших добычей саблезубых тигров. Это наблюдение навело нас на мысль, что гоминиды, возможно, имели некоторое отношение к вымиранию саблезубых тигров около 1,5 млн. лет назад. Здесь важно отметить, что эти крупные хищники просуществовали дольше в Европе и Америке, чем в Африке, и вымерли лишь после того, как на эти континенты переселились гоминиды.

Охота на очень мелких животных, возможно, была древнейшей стратегией гоминидов, а с появлением метательного оружия *Homo sapiens* стал намного более искусным охотником, чем любой другой примат. Тем не менее такой способ добывания пищи, как подбирание падали, оказал более заметное влияние на эволюцию человека, чем до этого было принято думать.

Наука и общество

Шумные нуклеотиды

УЛИЧНОЕ движение, землетрясения и выборы президента обычно кажутся событиями случайными. Однако те, кто занимается теорией хаоса и так называемыми фракталами, находят в подобных непредсказуемых явлениях свой порядок. Сейчас к списку фракталоподобных структур добавилась ДНК. «Здесь какое-то магическое действие, которое мы просто не понимаем», — говорит физик Х. Юджин Станли из Бостонского университета.

Кажущиеся упорядоченными картины фракталов появляются из-за того, что любое состояние в хаотической на первый взгляд системе на самом деле обусловлено ее предыдущим состоянием — так долгая «пробка» из медленно ползущих автомобилей может быть вызвана одним заехавшимся и резко затормозившим водителем. Расчеты, проведенные Станли с сотрудниками, а также У. Ли из Рокфеллеровского университета и Р. Воссом из Научного центра Томаса Дж. Уотсона компании IBM показали, что положение нуклеотидов (аде-

нина, гуанина, цитозина и тимина) в последовательности ДНК в определенной степени зависит от предшествующего порядка их сборки.

Структура нуклеотидных последовательностей напоминает фликкершум (или 1/f-шум). Эти флуктуации — временные аналоги формы фракталов типа хлопьев снега или очертания береговой линии, обладающих свойством самоподобия: структура их составных частей напоминает структуру целого. Процессы с 1/f-шумом преобладают в природе так же, как их геометрические эквиваленты; они обнаруживаются в столь различных системах, как электрические сети и морские приливы. «Это особая форма корреляций, существующая в природе и в человеческом поведении», — говорит Восс, обнаруживший их в музыке.

Если сигналы совершенно случайны, как результаты подбрасывания монеты, их совокупность называют «белым шумом». Если монета специально не утяжелена, вероятность ее выпадения одной из сторон — орлом либо решкой — составляет 50% независимо от предыдущего результата. В целом получится набор случайных сигналов, напоминающий шипение между соседними радиостанциями в диапазоне УКВ.

Как отмечает Чун Кан Пен из группы Станли, если на определенном участке нужно записать как можно больше информации, лучший способ ее хранения — это белый шум. Дело в том, что при таком способе каждый сигнал совершенно независим от прочих и несет свое собственное сообщение. Если бы генетические данные накапливались по принципу белого шума, вероятность обнаружить одну и ту же информацию в цепи ДНК снижалась бы экспоненциально по ее длине. «Если второй нуклеотид кодирует 50% того, что кодирует первый, то третий — только 25% и т. д.», — поясняет Пен.

Однако непохоже, чтобы пары оснований ДНК располагались совершенно случайно. С помощью различных статистических методов были проанализированы последовательности ДНК, собранные в картотеке генетической информации GenBank при Лос-Аламосской национальной лаборатории. Оказалось, что упомянутое снижение вероятности в них гораздо медленнее экспоненциального и порядок нуклеотидов примерно соответствует 1/f-шуму, причем f здесь — число оснований, через которое повторяется определенный нуклеотид.

Параллельно Ли обнаружил корреляции в интронных последовательностях ДНК. Интроны иногда называ-

ют «лишней» ДНК, поскольку они не кодируют структуру белков, информация о которой содержится в других последовательностях — экзонах. В отличие от интронов в экзонах нет корреляций между участками, удаленными на большие расстояния, и есть сходство с белым шумом.

Почему именно в интронах, а не в экзонах существуют такие корреляции, точно не известно. Предполагается, что корреляции, охватывающие тысячи нуклеотидных пар, — это своего рода компромисс между требованием высокой эффективности хранения информации и необходимостью защиты против ошибок кодирования. Поскольку изменения на одном участке вызывают изменения на других участках, в генетическом коде имеется некоторая избыточность. А корреляции могут обеспечить определенный иммунитет к ошибкам при транскрипции, как поясняет Восс. В экзонах, содержащих жизненно важную информацию, корреляций между далеко расположенными участками нет, так как они должны обладать как можно большей информационной емкостью.

Восс усматривает некоторые любопытные закономерности, связанные с эволюционной классификацией. Так, в нуклеотидных последовательностях организмов низшего эволюционного уровня (бактерий и бактериофагов) корреляций меньше всего. Их степень возрастает у более высокоорганизованных существ, приобретая в точности закономерность типа 1/f у беспозвоночных, а затем постепенно снижаются у позвоночных до уровня, наблюдаемого у млекопитающих, грызунов и, наконец, приматов.

Станли и его коллеги собираются опубликовать несколько иные результаты. По их мнению, степень корреляции возрастает при движении вверх на всей эволюционной лестнице. «Эволюция означает постоянное усиление корреляций на больших расстояниях», — говорит Станли.

Получается, что относительно простым организмам (у которых ДНК короче) не требуется защита от ошибок, необходимая для сохранения более сложных нуклеотидных последовательностей. «По-видимому, речь идет о каком-то общем принципе», — замечает Восс. Природе свойственны такие фрактальные и 1/f-флуктуации, и системы, развивающиеся в естественных условиях, должны, как он считает, строиться в соответствии с закономерностью этих корреляций.

Вероятно, это отчасти объясняет, почему музыка доставляет удовольствие. «Согласно одной из гипотез, она имитирует природу и после-

довательности звуков в ней соответствуют 1/f-закономерности», — говорит Восс. Однако пока нет общей модели, которая бы объясняла повсеместное присутствие фрактальных и 1/f-явлений. Подобно многим ученым и спешащим клеркам, Ли жалуется: «Впереди еще много работы!»

Филип Ям

Нашествие чужаков

ОНИ появляются незамеченными, проникая в воды бухт, эстуариев и просто в прибрежную полосу океана из балластных цистерн судов, совершивших дальний морской переход. Здесь они могут погибнуть или же — удивительно быстро — нарушить экологическое равновесие. В последнее время такие экзотические водные виды прибывают в Америку чаще, чем раньше, и во все возрастающих количествах. Радости это не вызывает.

Речная дрейссена, прибывшая в середине 1980-х годов «зайцем» из Европы в озеро Сент-Клар (система Великих озер), — наиболее неприятный из подобных поселенцев. Она уже распространилась по бассейнам рек Гудзон, Саскуханна и Миссисипи, где стала засорять водозаборные трубы. Организмы из портов всего мира все больше смешиваются, переносимые из одной экосистемы в другую с балластными водами судов. «Эта проблема гораздо серьезнее, чем кажется», — утверждает У. Кортни-младший из Флоридского атлантического университета, изучающий интродуцированных рыб. — Экологические последствия таких переселений очень слабо изучены».

Кортни и его коллеги вовсе не ксенофобы. Их беспокоят масштабы возможного биологического и экономического влияния множества видов-иммигрантов. Глобальное смешивание водных фаун ведет к потере биологического разнообразия — так считает специалист по балластным водам судов Дж. Карлтон, который руководит программой морских исследований порта Мистик, проводимой Колледжем Уильямса.

В распространении заносных организмов, безусловно, нет ничего нового. Тысячи видов растений были целенаправленно или случайно интродуцированы человеком в новые для них регионы. Среди животных то же самое происходило, скажем, с черным тараканом и серой крысой. Примерно 100 лет назад заморские организмы начали прибывать в США и путешествовать по ним в балластных водах. С тех пор в пресных водоемах, эстуари-

ях и вдоль морского побережья страны обосновалось, как отмечает Карлтон, множество, так сказать, экзотических видов.

В последние годы на водный путь интродукции стали обращать больше внимания. По данным Института транспорта в Вашингтоне, китайские и восточноевропейские суда, получив разрешение заходить в большее число портов США, проложили новые торговые пути. Торговый флот, занимающийся международными перевозками, сейчас включает 39 896 кораблей. Суда становятся крупнее — и могут принять на борт больше «зайцев»; суда становятся быстрее — и меньше нелегальных пассажиров гибнет в пути.

Уже после обнаружения в 1988 г. бурно размножающейся, засоряющей трубы речной дрейссены в балластных водах прибыли и обосновались в США два вида колочеперых рыб, называемых бычками, из Черного и Каспийского морей, обитающий в Индийском и Тихом океанах вид крабов, азиатский вид крошечных веслоногих рачков и еще один вид дрейссены из Черного моря. Это лишь несколько примеров из сотен завозимых ежемесячно интродуцентов. Проанализировав балластную воду 159 японских судов, Карлтон обнаружил живых представителей более 350 видов только планктонных организмов.

Если речная дрейссена наносит явный экономический ущерб (расходы на борьбу с ней и ремонт оборудования в ближайшие 10 лет составят по оценкам 5 млрд. долл.), убытки, которые несут с собой эти новые поселенцы, еще предстоит оценить. К счастью, выяснилось, что бычки питаются речной дрейссеной. Однако старший научный сотрудник факультета природных ресурсов Корнеллского университета Э. Миллз предупреждает, что ее второй вид может жить в более теплых водах, чем предыдущий, а значит, способен расселиться по США гораздо шире.

Неопределенность здесь может дорого обойтись. Например, как раз сейчас изучаются последствия заноса в США в 1986 г. европейского речного ерша. Эта похожая на окуня рыба, питающаяся икрой других рыб, быстро размножилась в некоторых частях озера Верхнее. «У себя на родине ерш — вредитель», — говорит Д. Пратт из департамента природных ресурсов шт. Висконсин. — Скорее всего он окажется вредителем и у нас». По словам Д. Коттингема, возглавляющего отдел экологии и охраны окружающей среды Национального управления по исследованиям океанов и атмосферы, принято решение выде-



НЕЛЕГАЛЬНЫЕ ПАССАЖИРЫ океанских судов, как, например, моллюск, называемый речной дрейссеной, могут принести неприятности на новом месте. Опасность заноса таких организмов возрастает с появлением новых торговых путей, увеличением емкости балластных цистерн судов и их быстроходности. (Фотография: Renee Stockdale/Animals Animals.)

лить на борьбу с ершом 1,2 млн. долл.

Ерш и речная дрейссена — только два примера интродуцентов, резко нарушающих экологическое равновесие Великих озер. «Экзотические виды уже давно опустошают их», — утверждает Пратт. Например, ежегодно расходуется 10,1 млн. долл. на борьбу с морской миногой, попавшей сюда в начале XIX в., которая паразитирует на крупных промысловых рыбах. Сельдевая рыба большеглазый помолоб, поселившаяся в Великих озерах через несколько десятилетий после миноги, вытеснила более выносливую местную сельдь. В периоды массовой гибели помолоба вымирают соответственно и питающиеся им хищники, среди которых такие разводимые виды, как лосось и форель. Зарыбление Великих озер обошлось в 1988 г. в 44,7 млн. долл.

В настоящее время нет оценок количества балластных вод, сбрасываемых в США, но, по мнению Карлтона, оно огромно. Например, он обнаружил, что только в марте 1991 г. в Норфолке (шт. Виргиния) было слито около 100 млн. л. Причем это не единственный путь интродукции: аквакультура, промысловое рыболовство, любительская аквариумистика тоже небезгрешны. В результате недосмотра владельцев аквариумов и рыбководных хозяйств Национальный парк Эверглейдс (шт. Флорида) «превратился в настоящий отстойник экзотических рыб», по словам Кортни.

Хотя изданы специальные законы, призванные защитить местную среду от нежелательных интродуцентов вроде речной дрейссены, эффективность их невелика. Так, статья принятого в 1990 г. закона о профилактике нарушений водной среды и борьбе с ними, требующая, чтобы суда сбрасывали балластную воду, прежде чем заходить в порт, до ноября 1992 г. была рекомендательной, а сам закон и по сей день касается только Великих озер. Кроме того, 2 млн. долл., ассигнованные на оценку последствий интродукций и надежности технологий обмена балластной воды (т. е. судно спускает ее на большую глубину и оттуда же забирает новые порции), еще не распределены на конкретные исследования, хотя изучение роли морского транспорта уже идет. «Результаты как будто уходят в песок», — говорит Коттингем. А что касается общенационального законодательства, то, по его мнению, не стоит ожидать его в ближайшем будущем.

Тем временем в страну, по всей видимости, продолжают прибывать все новые экзотические виды. Например, Карлтон ожидает увеличения их разнообразия в Чесапикском заливе. «Балластные воды вряд ли будут включены в десятку важнейших проблем залива, хотя вполне этого заслуживают», — считает он. — Каждый день мы прямо-таки играем в биологическую рулетку».

Маргерит Холлоуэй

О РЕФОРМЕ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В США



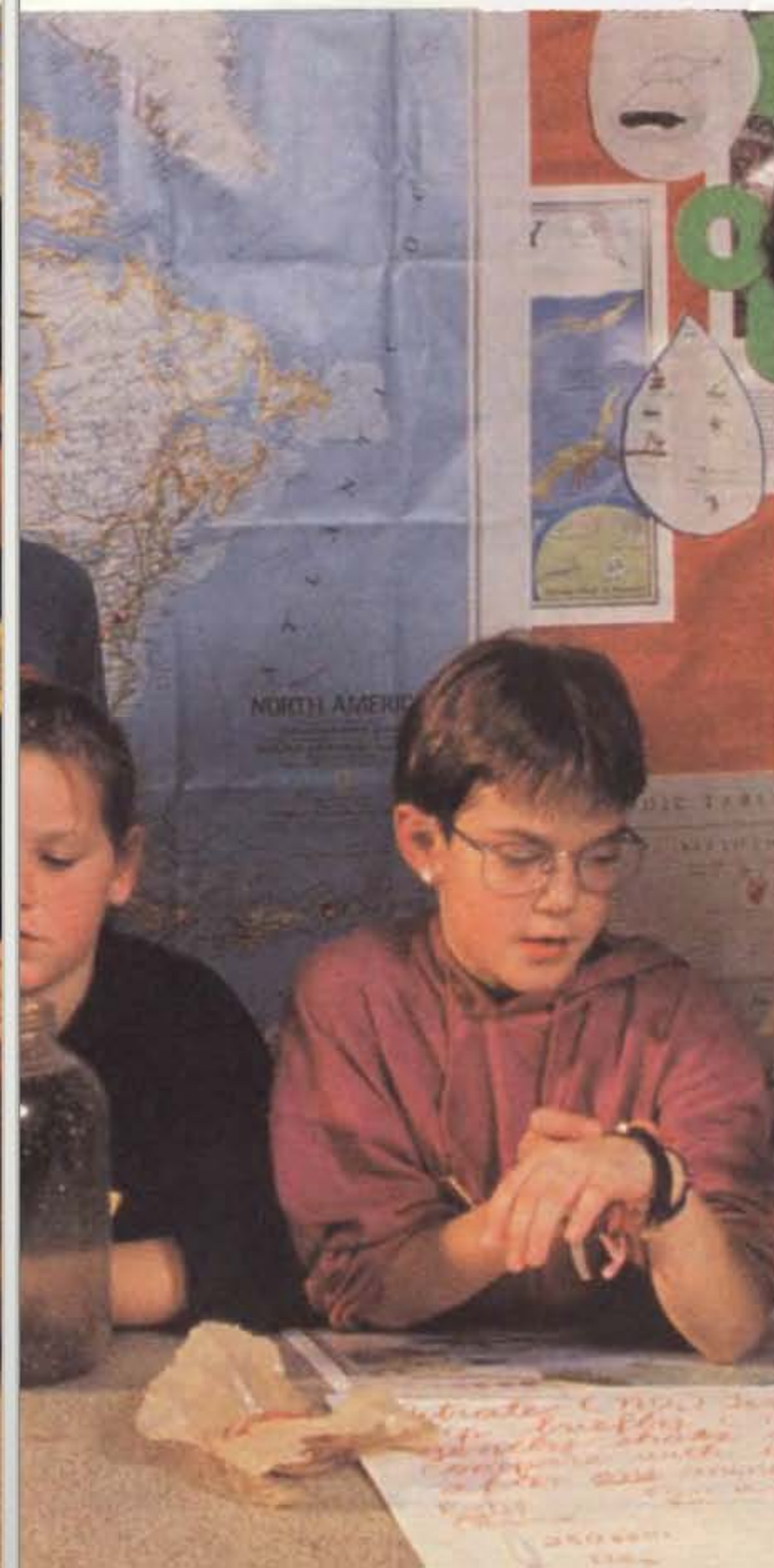
Американская система обучения естественнонаучным дисциплинам в школах должна быть изменена кардинальным образом. На этом пути предстоит преодолеть немало трудностей

Тим Бердсли

В ИЮНЕ 1992 г. группа из 20 преподавателей и ученых собралась в Центре Арнольда и Мейбл Бекманов при Национальном научно-исследовательском совете в Ирвине (шт. Калифорния). После двух интенсивных двухнедельных заседаний, затраченных на составление и редактирование окончательного документа, они выработали предложения по изменению системы образования в США, которые всего несколько лет назад были бы просто немыслимы. Эти предложения сводились к тому, чтобы государственные стандарты на учебные программы по научным дисциплинам для детей и молодежи с детского сада до 12-го класса школы предусматривали свободу действий. Ожидалось, что первые отчеты о проводимой в этой области работе будут представлены на конференциях уже этой осенью.

Эти инициативы были порождены широко распространенным убеждением в том, что школьное обучение математике и естественным наукам в США находится на таком низком уровне, что радикальные реформы просто необходимы. Комиссия Карнеги по науке, технологии и управлению, например, заявила в прошлом году, что снижение образовательного уровня является хроническим и представляет собой серьезную угрозу будущему нашей страны». В отчетном докладе комиссии указывалось,

ИЗУЧЕНИЕ НАУК становится интересным, когда дети ставят опыты. Изображенная на фотографии группа школьников пользуется компьютером, подсоединенным к Детской сети National Geographic, которая позволяет детям всего земного шара обмениваться результатами своих экспериментов.



что когда 47% 17-летних американцев не могут выразить в процентах девятую часть от 100 и когда 63% взрослых американцев считают, что лазер фокусирует звуковые волны, «мы понимаем, что обучение научным дисциплинам в нашей стране не отвечает требуемому уровню».

Преподаватели по всем предметам жалуются, что классы переполнены и что у них нет времени на подготовку к урокам. Но самый сильный удар по науке наносит некачественная подготовка преподавателей и нехватка средств на приобретение необходимого и постоянно дорожающего оборудования. Кроме того, преподаватели научных дисциплин вынуждены тратить силы на то, чтобы компенсировать недостатки скудно написанных и полных ошибок учебников, которые в ущерб точности зачастую составляются в угоду религиозным чувствам членов комиссий, утверждающих учебный материал, в наиболее влиятельных штатах, таких как Техас и Калифорния. Все эти факторы обусловили создание такой системы, которая подавляет у молодежи стремление к овладению научно-техническими дисциплинами.

Более того, отвращение к науке не только считается приемлемым среди школьников, но этим еще и бравируют. В отчете проведенного по инициативе конгресса исследования развития сферы образования в масштабах всей страны, опубликованном в этом году в сборнике «The 1990 Science Report Card», указывалось, что относительное число учащихся, ответивших «нет» на вопрос «Любите ли вы науку?», увеличивается с 20 до 35% соответственно среди школьников с 4 по 12 класс. «Мы нарушаем клятву Гипократа в ее первом пункте — не причинять вреда», — говорит Дуглас Лэпп, директор Национального центра научных кадров в Вашингтоне, который выступает за проведение реформ в области образования.

Видные и рядовые ученые, преподаватели, которые собирались в Ирвине, надеются, что общее согласие, которого они пытаются достичь в отношении структуры учебных программ по научным дисциплинам, к 1996 г. позволит реализовать то, к чему на протяжении многих лет они безуспешно призывают. Их негласная цель заключается в том, чтобы убедить школьных учителей отказаться от

преподавания большинства научных дисциплин по существующим программам и все начать сначала. По заявлению Национального научно-исследовательского совета (ННИС), координирующего деятельность сторонников реформ, типовые учебные программы должны представлять собой «сжатые описания того, что каждый учащийся должен знать о науке и ее прикладном значении». Упомянутый совет также контролирует разработку отдельных типовых программ для обучения и для оценки знаний учащихся. Как указывает Кеннет Хофман, член ННИС, имеющий большой опыт работы в сфере образования, в программах для обучения должно быть указано, «что обязан знать преподаватель и что он должен уметь делать». В типовых программах по оценке знаний учащихся должны сохраняться критерии такой оценки.

Администраторы в сфере образования по всей стране, предвидя появление типовых программ, уже прилагают усилия к тому, чтобы подготовить такие учебные материалы, которые отражали бы и современные научные достижения, и передовые идеи в области освоения знаний. Они также настойчиво пытаются научить преподавателей пользоваться этими материалами.

Свою работу они проводят на фоне уже неоднократно предпринимавшихся неудачных попыток. Когда в октябре 1957 г. на околоземную орбиту был выведен первый спутник и его сигналы возвестили всему миру об успехах советской науки и техники, США отреагировали на это увеличением ассигнований на школьное образование. Но эта инициатива оказалась недолговечной. В начале 1970-х годов правые силы в конгрессе выступили с нападками на курс по общественным наукам, изложенный Национальным научным фондом (ННФ), ссылаясь на то, что он будто бы оскорбляет традиционные американские ценности и демонстрирует вмешательство федеральных властей в дела штатов. Вскоре после этого семинары для учителей по преподаванию научных дисциплин прекратили свое существование, когда стало ясно, что эти семинары не дают ощутимых результатов. К 1982 г. программы обучения преподавателей под эгидой ННФ полностью себя исчерпали.

Вторая волна

В середине 1980-х годов программы по улучшению обучения научным дисциплинам получили новое развитие. Это случилось после того, как Национальная комиссия по совершенствованию системы образования опублико-

Какие мы издаем учебники

Издатели вздрагивают, когда читают бюллетень «The Textbook Letter», выпускаемый каждые два месяца Калифорнийской лигой цензоров учебной литературы. Уильям Беннетта, воинственно настроенный редактор этого бюллетеня, пишет, что, за исключением некоторых учебных пособий

для современных курсов повышения квалификации педагогов, большинство учебников «никуда не годится» и написаны дилетантами, ничего не знающими в том, о чем пишут. Вот несколько фрагментов из обзора, посвященного некоторым изданиям и помещенного в бюллетене:

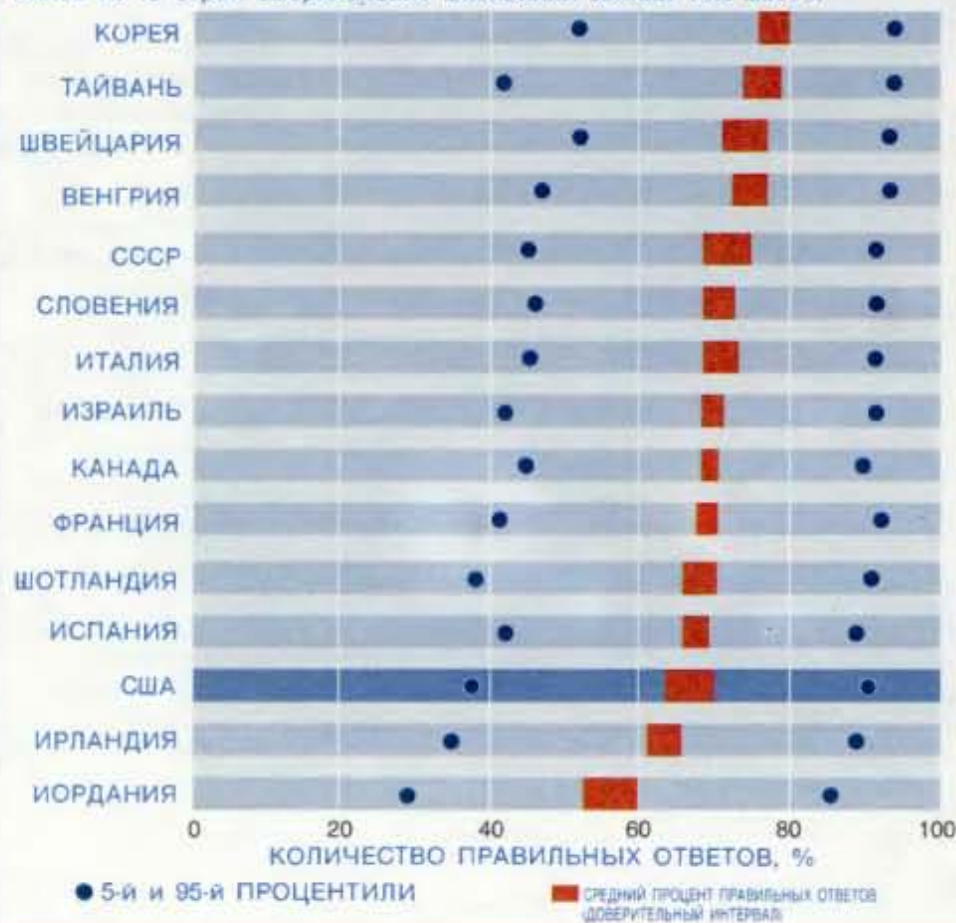
Наука о жизни (Life Science, издательство Addison-Wesley, 1989 г.): В книге содержится много вопиющих и принципиальных ошибок... В толковании термина эволюция читаем: «См. теория эволюции путем естественного отбора». А в статье под этим термином читаем: «Идея Чарлза Дарвина, утверждающая, что организмы видоизменялись постепенно в течение длительного времени. Дарвин считал, что полезные изменения возникали случайно, но что индивидуумы с этими изменениями имели больше шансов на выживание и на потомство, и они передавали эти изменения по наследству». Это неправильно... Мысль о том, что организмы изменялись со временем и эволюционировали, не принадлежит Дарвину, и это не то же самое, что естественный отбор... (Из критической статьи Эллен Уивер.)

Физическая наука: Проблемы открытия (Physical Science: The Challenge of Discovery, издательство D. C. Heath and Company, 1991 г.): Книга настолько плохо написана, что ее следует изъять из продажи... После сказанного (на с. 590) о том, что «первобытные люди обнаружили, что древесный уголь при сгорании дает больше тепла, чем дерево», авторы утверждают: «Этот вид угля использовался для обогрева в тех местах, где деревья почти не остались». Эта книга, хотя и содержит слово «наука» в своем названии, не более чем пародия на науку... На с. 156 сказано, что из меди хорошо делать кастрюли, потому что ее теплоемкость низка, т.е. температура ее увеличивается заметно (!) при сообщении небольшого количества теплоты. А через четыре страницы дальше говорится, что медь широко используется благодаря ее высокой теплопроводности. Создается впечатление, что у авторов все перепуталось в голове... (Из критической статьи Лоуренса Лернера.)

Наука о жизни (Life Science, издательство Macmillan Publishing Company, 1989): На с. 9 приводится вымышленный рассказ о витамине С. «В первые годы XIX в., — пишут авторы, — несколько «биологов» провели исследования и обнаружили, что моряки часто болеют цингой, потому что в их пище отсутствовал витамин С». А затем: «Когда лаймы, лимоны и апельсины (фрукты, богатые витамином С) были включены в их рацион, признаки болезни исчезли». Все это не так... Преду-жедение цинги рационом питания... было установлено не биологами, а голландскими и английскими морскими офицерами; среди них был и известный капитан Джеймс Кук, живший в XVIII, а не в XIX в. Кроме того, авторы используют термин «витамин С», а это устаревшее понятие и оно сбивает с толку. (Из критической статьи Лейтона Тейлора.)

Удручающие результаты

При сравнении уровня знаний в области естественных наук американские учащиеся обнаружили худшие результаты, чем их сверстники из других стран. Сравнительная проверка проводилась в 1990-91 гг. Международной организацией оценки уровня образования: среди 13-летних участников из 15 стран американские школьники заняли 13-е место.



вала в 1983 г. отчет под названием «Наша в опасности». Доклад побудил многие штаты повысить требования к выпускникам средних школ по математике и естественным наукам. Однако к 1990 г. лишь в 4-х штатах выполнили требования о рекомендованном в докладе 3-летнем курсе обучения основным наукам. «Создается впечатление, что нас посещают хорошие идеи, которые мы потом забываем», — говорит Сента Рейзен, директор Национального центра по улучшению научного образования в Вашингтоне (округ Колумбия).

За реформистскими инициативами скрывается вопрос: а сколько общество готово платить за образование? Во многих округах школы испытывают большой недостаток средств. «Как можно что-нибудь изменить, если мы переживаем кризис?» — спрашивает Карен Уорт, специалист из Центра развития образования в Нью-Йорке (шт. Массачусетс) и председатель рабочей группы ННИС, разрабатывающей типовые учебные программы по научным дисциплинам. По данным Национального центра статистики в области образования, в 1989 г. затраты на школьное образование одного учащегося в среднем по стране составили около 4000 долл., однако в десятках школьных округов этот показатель не достигает и поло-

вины указанной суммы.

В некоторых округах штатов Алабама и Миссисипи в школах не хватает книг и парт, не говоря уж о компьютерах. Другая удручающая проблема — это бедность. Как замечает Леон Ледерман, физик, лауреат Нобелевской премии, основавший академию для работающих в Чикаго преподавателей научных дисциплин, программа «Head Start», которая предусматривает обучение с раннего возраста детей из беднейших семей, охватывает менее 30% мальчиков и девочек, относящихся к этой категории. По оценкам Комиссии Карнеги, к 2000 г. каждый четвертый ребенок в США будет жить в бедности.

Сторонники унифицированных учебных программ, участвующие в движении за реформирование системы образования, утверждают, что на этот раз ситуация изменится. «Будут стандарты для всех и каждого», — заявил Хоффман. По его словам, все предыдущие попытки в корне пересмотреть программу обучения естественным наукам в США не предусматривали «системных изменений», которые влияют на всю систему образования. «Чтобы изменить эту систему, необходимо воздействовать на все ее структурные элементы», — вторит ему Джером Пайн, биофизик из Калифорнийского технологического ин-

ститута, который наладил успешное сотрудничество с Объединенным школьным округом Пасадены по преподаванию научных дисциплин.

Пайн и его единомышленники по осуществлению реформ выступают за введение системы непрерывной переподготовки школьных преподавателей по месту их работы взамен разовых курсов, по окончании которых они вынуждены вновь погружаться в трясину, царящую в школах, куда они возвращаются и где зачастую повышение квалификации педагогов не находит поддержки. В пропагандируемом Пайном и его сторонниками подходе большое место отводится также усовершенствованию методики оценки знаний учащихся. Преподаватели заявляют, что они отрицательно относятся к практике обучения с ориентацией на тестирование учащихся, т.е. заставлять их запоминать только те факты, знание которых вероятнее всего будет проверяться на экзаменах. И такая система обучения — явление повсеместное. «Распространенное повсюду стандартное тестирование приводит проверку знаний к тривиальной процедуре и сводит на нет интеллектуальный уровень и здравый смысл самого учителя в оценке уровня подготовки школьника», — с чувством гнева говорит Элеонора Дакуэрт, специалист по обуче-

нию детей из Гарвардского университета.

Организация, называемая «Проект новых стандартов», уже разрабатывает комплекс вопросов для экзаменов с ориентацией на их использование по всей стране и готовит перечень критериев, по которым должны оцениваться знания на экзаменах. Эта организация старается отойти от тестов, признанных сейчас стандартными, которые предусматривают выбор правильного ответа из множества предлагаемых. Вместо этого она пытается разработать такую форму экзаменов, которая позволила бы су-

дить о совокупных знаниях испытуемого и была бы основана на проверке способности решить ряд задач, подобно тому как знаки отличия скаутов говорят об их незаурядных качествах.

Независимость штатов и местных органов школьного образования — по-прежнему одна из самых серьезных проблем. Через них в школы поступает 94% финансовых средств, и по сложившейся традиции они ревностно защищают свои права на самостоятельное решение вопросов, чему учить и как оценивать уровень преподавания. «Концепция всеобщих

государственных стандартов до недавних пор представляла собой нечто такое, что люди не хотели воспринимать всерьез», — говорит Генри Хейккинен, профессор химии из Университета Северного Колорадо и председатель рабочей группы по разработке стандартов на учебные программы при ННИС. Однако Хоффман заявил: «Теперь я вижу, что все большее число специалистов в области образования склоняются к тому, что они должны поддержать новые начинания».

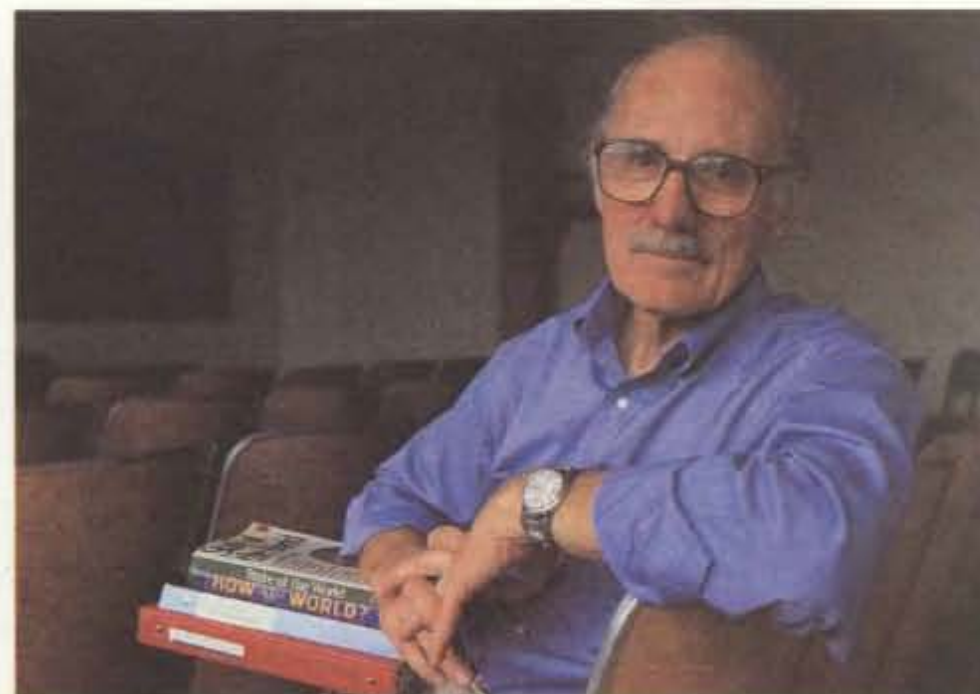
Политический Рубикон был перейден на совещании «высшего уровня»

по проблемам образования, созванном президентом Джорджем Бушем в Шарлотсвилле (шт. Виргиния) в 1989 г. (Председательствовал на этом совещании губернатор штата Арканзас Билл Клинтон.) Удрученные результатами ряда исследований, показавших со всей откровенностью, насколько США за последнее десятилетие отстали от большинства других стран в области математики и естественных наук, губернаторы всех 50 штатов согласились поставить свои подписи под предложенным президентом перечнем «Национальных задач в сфере образования».

Этот перечень правильнее будет назвать слишком смелым. Так, один пункт, например, гласит: «К 2000 г. учащиеся США будут первенствовать в мире по уровню знаний в области естественных наук и математики». Как указывает Фрэнк Мюррей, декан Колледжа образования при Делавэрском университете, не ясно даже то, в чем американские учащиеся будут первенствовать, так как сам вопрос об оценке знаний по-прежнему вызывает споры.

Большинство учителей были бы удовлетворены, если бы наметилась хоть какая-то тенденция к устойчивому улучшению, а администраторы в сфере образования как всегда подходят к определению целей прагматически. Многие согласились с доводами, приведенными Дианой Рэвитч, ответственной за исследования в сфере образования: «Если вы будете работать ради достижения определенных целей, то вы приблизитесь к ним, — говорит она. — Но дело в том, что американская образовательная система никогда не ставила перед собой каких-либо целей».

Учителя, ученые и политические деятели, однако, настроены менее оптимистично в отношении стратегии «Президент за образование», предложенной в прошлом году для достижения упомянутых целей под лозунгом «Америка 2000». Так, многие специалисты в области просвещения рассматривают эту программу как результат циничных политических расчетов, а не как серьезный анализ того, что необходимо сделать. Из 770 млн. долл., например, которые администрация запросила для программы «Америка 2000» на 1993 г., 500 млн. предполагается израсходовать на помощь штатам по выпуску ваучеров, которые родители смогут использовать на покрытие стоимости обучения своих детей в частных школах. «Просто непонятно, почему они не отдали эти деньги беднейшим школьным округам?» — заявил Билл Олдридж, исполнительный директор



ДЖЕЙМС РЕЗЕРФОРД возглавляет рассчитанную на долгий период программу «Проект 2061», осуществляемую Американской ассоциацией развития науки и предусматривающую изменение методов преподавания научных дисциплин.

Национальной ассоциации преподавателей научных дисциплин, активно выступающий за реформирование учебных программ.

Другой важной составляющей программы «Америка 2000» является создание по меньшей мере 535 показательных школ, по одной или больше в каждом округе. Роллин Джонсон, консультант Комиссии Карнеги, указывает, что эти округа далеко не одинаковы, и поэтому постройку новой школы в каждом из них нельзя считать достаточно эффективной мерой изменения ситуации к лучшему. Из 16 тыс. школьных округов в стране в 250 обучается 30% всех будущих трудовых кадров. «В любом случае, если построят несколько сот показательных школ, то это еще не значит, что все проблемы будут решены», — замечает Рейзен.

Однако помимо выпуска ваучеров и строительства показательных школ, программа «Америка 2000» предусматривает также издание национальных стандартных (типовых) учебных программ по наиболее важным предметам, включая математику и естественнонаучные дисциплины. Несмотря на все сомнения относительно правильности общего выбранного направления, учителя и ученые понимают, что введение типовых программ дает возможность повысить уровень подготовки учащихся. Они считают, что им лучше согласиться на проведение реформ, чтобы потом не оказаться «за бортом». Фрэнк Пресс, президент Националь-

ной академии наук, добился заключения контракта о координировании разработки типовых программ, которую будет осуществлять ННИС — рабочий орган академии наук.

Как заявил советник президента по науке Аллан Бромли, типовые учебные программы по научным дисциплинам, которым в настоящее время рабочая группа Хейккинена придает окончательный вид, будут допускать большую свободу действий местных органов образования. Они, например, не будут устанавливать, что должны знать учащиеся по окончании каждого класса. Вместо этого они сформулируют согласованное мнение о том, каким объемом знаний должен владеть учащийся довольно широкого возрастного диапазона. По словам Бромли, попытки принудить штаты принять жесткие требования национальной программы лишь замедлят введение новых стандартов.

Тем не менее федеральные власти все-таки смогут оказывать достаточно явное давление на штаты, чтобы сохранять над ними известный контроль. Как заявила Рэвитч, ученые — потенциальные получатели субсидий, выделяемых министерством образования, на разработку проектов по совершенствованию преподавания естественнонаучных дисциплин, — должны будут продемонстрировать, что их проекты отвечают национальным критериям. Власти штатов используют сейчас некоторые из этих субсидий для разработки собственных типовых учебных программ.

Неутомимый реформатор

Билл Олдридж, исполнительный директор Национальной ассоциации преподавателей научных дисциплин, признанный в прошлом физик, который принимает активное участие в кампании по реформированию школьных учебных программ, проводимой ассоциацией и называемой «Широкий охват, последовательность и координация». Олдридж выступал за то, чтобы ассоциация взялась за разработку национальных стандартов на учебные программы до того, как он согласился, чтобы эту задачу взял на себя Национальный научно-исследовательский совет. Однако его критиковали за то, что он писал тексты учебников до завершения программ «Широкий охват, последовательность и координация», пользуясь ее побочными данными.

Бескомпромиссное отстаивание своей точки зрения на преподавание основных научных дисциплин привело Олдриджа к конфликту со сторонниками движения «Наука, технология и общество» (НТО), которые считают, что науку нужно сделать «удобоваримой» и преподносить ее в связи с общественными задачами. «В центре этой проблемы должен быть сам учащийся», — утверждает Роберт Ягер, один из сторонников НТО из

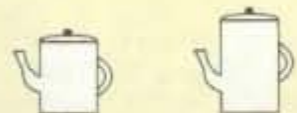
Университета Айовы, который переделывает на свой лад учебные программы Олдриджа. Однако у Олдриджа нет времени на то, чтобы заниматься выхолащиванием науки. «Когда я говорил, как нужно объяснять учащимся, что такое плотность, треть преподавателей средних школ не могли пользоваться делением на линейке, чтобы измерить доли дюйма, — с сожалением констатировал он. — Они были похожи на людей, которые хотели, скрывшись от кислотного дождя, произвести замеры его содержания».

Олдридж утверждает, что используемые на экзаменах традиционные тесты с вопросами не позволяют выявить истинных знаний учащихся. Вот типичный пример вопроса: Какие из перечисленных газов должно вдыхать животное, чтобы не умереть? а) гелий, б) водород, в) азот, г) кислород. Олдридж предлагает свои формулировки вопросов (см. ниже). Однако Растем Рой, профессор материаловедения в Университете шт. Пенсильвания и сторонник движения НТО, считает, что вопросы Олдриджа под стать только будущим докторам наук. «Он стремится подготовить более квалифицированных ученых, но нам ученые уже не нужны», — говорит Рой.

1. 11 ч. вечера в конце сентября. Когда вы смотрите на запад, немного к югу, вы видите Луну прямо над горизонтом (примерно под углом 15°). Изобразите на рисунке, какой видится Луна. Если она неполная, покажите, какая часть видимого диска темная и какая — освещена Солнцем. Где будет Луна вечером следующего дня в то же время? Выше или ниже над горизонтом?

2. Здесь изображены два кофейника, стоящие на столе на одном уровне над землей. Оба они цилиндрические и имеют одинаковую площадь поперечного сечения. В каком кофейнике будет больше кофе? Поясните свой ответ.

3. Допустим, вы взвешиваете стакан, наполненный водой. Затем вы взвешиваете такой же стакан с водой, но с плавающим в ней деревянным брусочком. В каком случае стакан с водой будет тяжелее? Поясните свой ответ.



[Ответы см. на с. 196]



БИЛЛ ОЛДРИДЖ — сторонник глубокого усвоения детьми научных знаний.

Никто не верит, что национальные стандарты позволят США достичь к 2000 г. таких целей, как лидерство в сфере школьного обучения математике и естественнонаучным дисциплинам, обеспечение грамотности всего взрослого населения или полного исключения в школах такого явления, как наркомания. Для этого слишком мало времени: те, кто в 2000 г. будет оканчивать среднюю школу, сейчас уже учатся в пятом классе и, вполне вероятно, что они уже отстают от своих сверстников в Корее, Тайване и в Швейцарии — в странах, занявших три первых места в сравнительной проверке знаний математики и научных предметов у 13-летних юношей и девушек, проведенной недавно Службой проверки уровня образования. Среди команд из 15 стран американские участники оказались на 13 месте, опередив только школьников из Иордании и Ирландии, знания которых оказались еще хуже. «Не все согласны с тем, как проводятся такие сравнения знаний молодежи, но как бы там ни было, сколько можно числиться в отстающих?» — говорит Лэпп из Национального центра научных кадров.

Для того чтобы убедиться в низком уровне преподавания научных дисциплин в средних школах США, совсем не обязательно проводить международные сравнительные проверки. Опрос 12 тыс. учащихся средних школ, проведенный в 1988 г., показал, что половина из тех, кто никогда не изучал биологию, обнаружили такие же знания, как и 40% тех, кто изучал этот предмет; вполне очевидно, что большинство изучавших биологию почти ничему не научились. Кроме того, в отчете за 1990 г. об уровне научных знаний учащихся говорится, что менее половины старшеклассников могут применить научные знания для правильной интерпретации данных, оценить значимость эксперимента и поставить его или проявить некоторую глубину научных знаний.

Хотя показатели уровня знаний школьников в 1980-е годы несколько улучшились после наблюдавшегося в 1970-е годы спада, результаты 1990 г. оказались не лучше, чем они были в 1970 г. По оценкам Лютера Уильямса, возглавляющего комитет по вопросам образования и человеческих ресурсов в Национальном научном фонде, американские работодатели ежегодно тратят около 100 млрд. долл. на переподготовку выпускников средних школ и повышение уровня их знаний по основным предметам.

И все же национальные стандарты должны ликвидировать некоторые различия в системе образования между штатами, если учесть опыт с введе-

нием единых стандартов на преподавание математики. В прошлом году Национальный совет преподавателей математики выпустил повсеместно одобренные национальные стандарты, и во многих штатах уже разработаны учебные программы с учетом требований этих стандартов.

Заинтересованность учащихся

Смогут ли более жесткие требования улучшить систему школьного образования в отсутствие глубоких социальных преобразований — вопрос открытый. Те, кто занимался изучением того, как обучаются люди в разных странах, считают, что в неприязни американских учащихся к математике и естественнонаучным дисциплинам частично повинно отношение общества. Эти предметы считаются трудными. Исследования, проведенные Харольдом Стивенсоном и его коллегами из Мичиганского университета, показали, что и в Японии, и в Китае учащиеся и их родители придают большее значение овладению научными дисциплинами, чем в США.

По словам Джона Бишоп, специалиста по вопросам образования из Корнеллского университета, основная причина того, что американские школьники обнаруживают низкий уровень знаний, заключается в «отсутствии хороших примеров учебы в средней школе». В отличие от других стран, в США стандартные тесты, которые предлагаются на экзаменах старшеклассникам, позволяют выяснить скорее их способности, а не объем усвоенных знаний. Основными же показателями уровня знаний являются отметки и статус ученика в классе, в котором он учится, но эти показатели относительны.

Бишоп считает, что доступность высшего образования определяется возможностью платить за обучение, а вовсе не уровнем знаний. Поэтому, утверждает он, учащиеся почти ничего не получают от проявления усердия в учебе, а родители мало заинтересованы в увеличении налогов на школьное образование. «Никто из молодых людей не хочет, чтобы его считали выскочкой, зазнайкой, подхалимом, любимчиком, а именно так воспринимают тех, кто учится старательно и чье усердие заметно», — говорит Бишоп.

Одним из следствий этого является то, что лишь немногие из выпускников средней школы продолжают изучать естественные науки. Биология — единственная наука, которую изучают большинство учащихся средних школ. В 1990 г. менее 50% выпускников школ выбрали химию и только 20% предпочли физику. В 1985 г. в 19% средних школ физика вообще не преподавалась, а в 9% школ не преподавалась химия.

Еще в 1916 г. Джон Дьюн постоянно подчеркивал важность того, чтобы все учащиеся, а не только немногие избранные, получали основы научных знаний. Однако, как показывают результаты многих исследований, большинство детей уже с раннего возраста полностью безразличны к математике и другим наукам. Обычно они испытывают скуку или страх на занятиях, где требуется механическое запоминание слов, которые нужны только для прохождения тестов. Как правило, девочки, а также дети из национальных меньшинств (исключая лиц азиатского происхождения) испытывают особое неприятие к математике и другим наукам.

Отношение к тем или иным предметам трудно изменить, но среди специалистов почти нет разногласий отно-



УЧАЩИЕСЯ частной школы Сент-Эндрю в Миддлтане (шт. Делавэр) воздвигают платформу для наблюдения за скопами (семейство ястребовых) на принадлежащем школе озере (слева). Учащиеся государственных школ редко имеют такие возмож-

сительно того, как следует преподавать математику и другие научные дисциплины, по крайней мере в младших классах. Все педагоги со времен Дьюн говорили о том, как важно, чтобы учащимся разрешали самим ставить эксперименты и проводить наблюдения, чтобы они испытали необычайное волнение, которое приходит с научным открытием. И все сходится на том, что интерес к науке легче всего пробудить у ребенка в начальной или средней школе.

Но несмотря на это, в школьных программах многих штатов научным дисциплинам не уделяется достаточного внимания. Большинство преподавателей начальных школ не имеют никакой подготовки по этим предметам. Хуже того, многие начальные школы просто не способны обеспечить учителей учебными методическими материалами, необходимыми для преподавания научных дисциплин. Не лучше обстоит дело и в старших классах начальной школы. Что же касается средней школы, то там, как говорит Лэпп, учителя вынуждены пользоваться устаревшими учебниками и методической литературой.

Кроме того, научные дисциплины учащимся средних школ преподносят в виде «не аппетитного» для их усвоения «слоеного пирога»: год — биоло-

гию, затем — год химию, а потом один год физику. Лишь немногие педагоги готовы защищать такой порядок, характерный для США. «Такая последовательность, практикуемая в США, лишает учащихся возможности получения целостного представления об основах науки», — отмечалось в прошлогоднем отчете Комиссии Карнеги. И даже в старших классах учащимся редко предоставляется возможность участвовать в экспериментах: как указывается в отчете «The 1990 Science Report Card», 26% учащихся 12-х классов, которые изучают научные дисциплины, заявили, что они никогда не проводили экспериментов.

Причины этого понять не трудно. Подготовка материалов и приобретение оборудования, необходимых для практической демонстрации опытов, требуют времени, усилий и иногда больших денег. Учителям гораздо легче ограничиться учебником. И хотя издатели учебников заявляют, что они стараются включать в них сведения о возможности экспериментальной проверки тех или иных теоретических положений, в отчетном докладе ННИС по преподаванию биологии указывалось два года назад, что «большинство профессиональных биологов, проверяющих тексты учебников по биологии для средних школ, пришли в ужас от того, что в них написано». Учебники «во многих случаях написаны скучным языком, а иногда в них содержатся ошибки, сбивающие с толку». Не удивительно поэтому, что столь малое число учащихся выражают желание изучать какой-либо другой предмет уже после биологии. И их можно понять: учебники по физике и химии ничем не отличаются в лучшую сторону.



ности. Даже если у них есть компьютеры, то они оснащены программами, не развивающими творческое мышление, и используются в отрыве от того, что изучается в классе (справа).

По мнению многих педагогов, решение этой проблемы лежит в области философии обучения, называемой конструктивизмом, которая поддержана в докладе 1983 г. «Наша под угрозой». Эта идея была сформулирована на основе результатов работы детского психолога Жана Пиаже, но ее с таким же правом можно отнести и к работам Дьюн, и к взглядам школы прогрессивизма, возникшей на рубеже прошлого и нынешнего веков и которая делает упор

на «наведение мостов» между дисциплинами. Конструктивизм утверждает, что дети, чтобы понять что-то, должны во все вкладывать свой смысл, и законом конструктивизма является формула «меньше означает больше». С этой точки зрения понимание лучше всего достигается тогда, когда учебные программы не требуют ничего лишнего и не предусматривают механического запоминания, а наоборот, стимулируют учащихся исследовать «широкое многообразие способов представления той или иной концепции», — говорит Мюррей из Делавэрского университета.

Задача заключается в том, чтобы внедрить это учение в практику. «У преподавателя в классе может царить некий «творческий беспорядок», но это совсем не значит, что там усваивают настоящую науку, — говорит Рейзен. — Преподаватели должны хорошо знать ту научную дисциплину, которая включена в программу обучения». Практические курсы по основам научных знаний, разработанные 30 лет назад, уделяли большое внимание исследовательской работе, но требовали от преподавателей немалых знаний. «Думаю, что в 1960-е годы мы обладали поверхностными знаниями в области психологии и педагогики», — говорит Роберт Тинкер из Центров исследования проблем технического образования в Кембридже (шт. Массачусетс).

Помимо проектов ННИС, касающихся разработки стандартов на преподавание научных дисциплин, сейчас предпринимаются некоторые меры к тому, чтобы избежать уже известных ошибок и заложить новые основы на будущее в сфере школьного образования. Говоря о множестве программ, ориентированных на решение этой проблемы, Рейзен иронически замечает: «Это то же самое, что всем сесть в такси и одновременно раскрыть зонтики». Одной из наиболее активно осуществляемых является программа «Широкий охват, последовательность и координация», начатая Олдриджем из Национальной ассоциации преподавателей научных дисциплин. Шесть исследуемых округов, включая 34 средние школы в Хьюстоне (шт. Техас) и несколько сот других школ от Аляски до Пуэрто-Рико в настоящее время разрабатывают и опробуют методические материалы, основанные на «главной идее», изложенной в основных положениях этой программы. В этих материалах отвергается традиционная последовательность в преподавании сначала биологии, потом химии, а затем физики. В них указывается примерный временной интервал, когда в



ВЕДУЩИЕ ИНСТИТУТЫ Национального центра научных кадров в Вашингтоне помогают школьным преподавателям и другим специалистам овладеть практикой постанов-

ки экспериментов. Участники очередного курса, проводившегося в июле 1992 г., занимались изготовлением электродвигателей собственными руками.

средней школе нужно одновременно преподавать все научные дисциплины.

Самой грандиозной задачей образовательной реформы, которая серьезно соперничает с программой «Широкий охват, последовательность и координация», является выполнение плана Американской ассоциации развития науки, известного как «Проект 2061». Директор проекта Джеймс Резерфорд, по-видимому, сожалеет о том дне, когда этот проект получил свое таинственное название, которое указывает год, когда комета Галлея вновь вернется в пределы Солнечной системы. Уже 25 лет эта дата является предметом острот по поводу того, что 2061 — это год, когда проект начнет оказывать реформирующее влияние на систему образования в США. «Не вижу, чтобы «Проект 2061» вносил какие-либо изменения сейчас, когда это так необходимо», — с насмешкой отзывается о нем Олдридж, который два года назад передал руководство этим проектом и стал инициатором программы «Широкий охват, последовательность и координация» и придал ее осуществлению невероятно быстрые темпы.

Резерфорд упорно повторяет словосочетание «Тише едешь — дальше будешь», имея в виду, что с коренным пересмотром системы естественнонаучного образования школьников, предпринятого «Проектом 2061», спешить не следует. «Ни та реформа, что была сделана снизу, ни та, что дела-

лась сверху, не дали желаемого результата. Нельзя просто разработать учебную программу и заставить всех следовать ей, — говорит Резерфорд. — И все же мы будем первыми».

Вообще говоря, «Проект 2061» не ставит своей целью разработку учебной программы как методического пособия для учителей, которые, пользуясь ею, могли бы составлять свои учебные планы. Эта задача будет решаться другими. Однако шесть рабочих групп, осуществляющих «Проект 2061» и насчитывающих каждая по 25 педагогов, серьезно размышляют над тем, как нужно преподавать естественнонаучные дисциплины в школе. Они изучают следующие вопросы: чем можно заменить существующие учебники и как должен быть построен учебный день в школе? Свои соображения по этим вопросам они излагают в «образцовых учебных программах». «Мы пытаемся создать новую научную культуру, в которой наука будет тесно увязана с искусством и гуманитарными проблемами», — с воодушевлением говорит Резерфорд.

Некоторые основные положения программы «Проект 2061» уже обнародованы. В них, в частности, говорится, что должны знать выпускники средней школы по различным научным предметам. Содержащиеся в этих положениях идеи, по словам Резерфорда, оказались полезными при разработке собственных учебных программ в различных округах и штатах и вызвали интерес и в других стра-

нах. Что же касается общеобразовательных целей, то в рамках «Проекта 2061» уже приступили к разработке требований относительно объема знаний, который должны усвоить и знать молодые люди различных возрастных групп. Результаты этой работы были заложены в стандарты на учебные программы, подготавливаемые ННИС, а также в «основы» учебных программ, разрабатываемых в Калифорнии.

Исследования, проведенные в рамках программы «Проект 2061», убедили Резерфорда в том, что обычные учебники становятся слишком большими и дорогими и уже «отжили свой век». Один из очевидных способов решения этой проблемы является использование в учебном процессе компьютеров. Хорошим примером в этом смысле является Детская сеть National Geographic, которая была разработана при участии Тинкера из Центров исследования проблем технического образования. Эта сеть дает возможность учащимся различных районов страны обмениваться полученными ими экспериментальными данными и сопоставлять их. Однако Ян Хоккинз из Бэнк-Стрит-Колледжа в Нью-Йорке, который написал одобренные многими образовательные программы для обучения с помощью средств массовой информации, заявил, что большинство общедоступных образовательных компьютерных программ не отличается высоким уровнем изобретательности по срав-

нению с упомянутой сетью детского образования. По словам Хоккинза, многие программы не развивают у учащихся способности углубленного мышления и используются лишь как заменитель традиционных методов обучения наукам. На состоявшемся летом 1992 г. присуждении премий за лучшие разработки в области компьютерной техники, проходившем в музее Computerworld Smithsonian, некоторые учебные средства мало чем отличались в лучшую сторону от высокотехнологичных версий контрольных карточек, используемых для лучшего запоминания изучаемого материала.

Сеймур Пейперт, эксперт в области использования компьютеров в учебных целях, сотрудник Лаборатории информационных носителей Массачусетского технологического института, считает, что эффективность использования компьютеров снижается, когда их устанавливают в специальных комнатах, к чему прибегают все чаще и чаще. Он предостерегает, что, поскольку многие школьные округа в настоящее время сокращают свои расходы, возможности эффективного использования компьютеров в сфере образования могут стать еще меньшими.

В то же время поиски различных нововведений в образовании продолжают, хотя и импульсивно. Некоммерческая компания, называемая Корпорацией развития новых американских школ (New American Schools Development Corporation), возникающая в рамках программы «Америка 2000», выделила средства 11 частным консорциумам на разработку проекта и строительство школ, принципиально отличающихся от традиционных, и которые, как надеется эта компания, будут обеспечивать более высокий уровень образования при тех же материальных затратах.

Однако эта компания сообщила очень скудные сведения относительно финансируемой ею концепции, несмотря на то, что первые такие школы предполагается открыть уже в следующем году и распространить эти же идеи на 535 образцовых школ, создаваемых в рамках программы «Америка 2000». И хотя президент Буш требовал от корпораций в прошлом году раздобыть 150—200 млн. долл. на эти цели, пока что собрано лишь 50 млн. долл.

Повышение квалификации преподавателей

Тем не менее некоторые надеются, что частный сектор окажется на высоте. Если бы план обеспечения финансовых гарантий, разработанный

администрацией, был принят конгрессом, что, по мнению правительственных чиновников, вряд ли вероятно в его нынешнем виде, то перспективы частных школ могли бы стать более радужными. Кристофер Уиттл, президент фирмы Whittle Communications в Ноксвилле (шт. Теннесси), возможно, окажется на гребне волны.

Уиттл, хорошо известный своей работой в коммерческом «Канале 1», программе новостей для школьного телевидения, объявил о планах создания сети частных школ, в которых будут реализованы самые современные идеи в области образования, обеспечивающие высокий уровень знаний и не требующие затрат, больших чем в государственных школах (и предусматривающих выплату поощрительных стипендий). Однако Бенно Шмидт-младший, бывший президент Йельского университета, который с начала 1992 г. стал помогать Уиттлу в его деятельности, не смог объяснить, как эти новые школы, которые они предполагают создать, намерены достичь невероятных результатов, и многие педагоги настроены весьма скептически относительно планов обоих реформаторов. Нэнси Хечингер, специалист в области образования в фирме Whittle, заявила, что она намерена привлечь родителей к преподаванию, и этим ее новшества почти исчерпываются.

Любые попытки улучшить обучение естественнонаучным дисциплинам или образованию в целом будут безуспешными без опытных и высококвалифицированных преподавателей. Франклин Лоу, декан ветеринарного факультета в Университете Тафтса, и Джон Слотер, бывший директор Национального научного фонда, а теперь президент Оксидентал-Колледжа в Лос-Анджелесе, считают, что увеличение числа преподавателей научных дисциплин в средней школе и повышение качества их подготовки — задача первостепенной важности.

По мнению Лоу, начинать следует с научных курсов, на которых обучаются большинство преподавателей средних школ для получения степени в области гуманитарных наук. Многие из таких курсов, как говорит Лоу, не обеспечивают достаточный уровень подготовки преподавателей «завтрашнего дня». По утверждению Комиссии Карнеги, более двух третей преподавателей математики и научных дисциплин не имеют того минимума знаний, который необходим для занятий на курсах и который установлен профессиональными ассоциациями.

Алан Крюгер, экономист из При-

нстонского университета, считает, что если уменьшить количество учащихся в классах и повысить заработную плату преподавателям, и связанные с этим дополнительные расходы покрыть за счет федеральных фондов, то это было бы более эффективным их расходованием, чем финансирование программы «Америка 2000». До недавних пор сторонники повышения заработной платы учителям как средства улучшения качества обучения располагали крайне малой информацией, чтобы выступать в поддержку своих предложений. Теперь Крюгер ссылается на результаты нового исследования, проведенного Рональдом Фергюсоном, ученым в области государственной политики из Гарвардского университета, поддерживающим эту стратегию. Фергюсон ознакомился с положением дел почти в 900 школьных округах в Техасе и установил, что преподаватели, которые обнаружили неплохие знания на проведенных по всему штату экзаменах по переехтестации, по всей вероятности, получают работу в тех округах, где учителям платят больше. Не удивительно поэтому, что их учащиеся демонстрируют лучшие знания на проверочных экзаменах, даже с учетом различия в их социально-экономическом положении.

Тем временем развернувшиеся по всей стране инициативы, направленные на улучшение научного образования, признают важность непрерывного обучения преподавателей. Многие из этих инициатив предусматривают сотрудничество с профессиональными учеными из университетов или федеральных лабораторий. Бромли отмечает, что образование сейчас официально стало одной из задач, которую решают правительственные органы, ответственные за развитие науки. Министерство энергетики, например, с 1990 г. следует примеру Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) и всячески поощряет свои научные лаборатории в установлении связей с местными школами. Учителя и ученики ходят на выставки и участвуют в исследованиях, а научные работники лабораторий осуществляют шефскую работу в школах.

В педагогической академии математики и научных дисциплин в Чикаго, основанной в 1990 г. Ледерманом, преподаватели городских школ проходят переподготовку, занимаясь два дня в полмесяца. На третий день они идут в свои классы с преподавателями-наставниками из академии, которые помогают им в практической работе использовать вновь приобретенные знания. Контроль за преподава-

нием учителей, обучающихся в академии, рассматривается как важная составляющая этой программы.

Другие проекты основаны на использовании технических средств, помогающих преподавателям в учебном процессе. Программа по совершенствованию методов преподавания математики и научных дисциплин, осуществляемая Институтом техники и управления GMI во Флинте (шт. Мичиган), ориентирована на использование аудио- и видеоаппаратуры для связи территориально удаленных друг от друга преподавателей и школьных классов. В программе, называемой «Project SEED» и разработанной Пайном из Калифорнийского технологического института, ученые работают вместе с преподавателями над учебными материалами, но лекций не читают. Старшие и более опытные преподаватели обмениваются опытом и рассказывают о своих практических достижениях.

Кроме того, уже можно говорить о положительных результатах, достигнутых благодаря разработке более качественных методических материалов для учителей. Национальный научный фонд уже приступил к разработке новых учебных программ для средних школ. А что касается начальных школ, то, как говорит Лэпп, Национальный центр научных кадров и другие организации разработали для учителей специальные модульные наборы по различным научным дисциплинам, которые рассчитаны на практическую работу самих преподавателей с целью повышения их квалификации. Эти наборы более со-

вершенны по сравнению с теми, которые выпускались 20 лет назад. По словам Лэппа, организации, находящиеся в подчинении указанного центра и занимающиеся переподготовкой учителей при использовании этих модульных наборов, пытаются развить у педагогов самостоятельность и творчество. Школьные округа, которые хотят направить своих преподавателей на переподготовку в эти организации, обязаны также направлять администраторов и ученых, которые будут оказывать помощь в практических занятиях учителей.

Бромли указывает, что федеральные расходы на программы обучения детей математике и научным дисциплинам в школах за последние 3 года возросли более чем в два раза. В 1993 г. правительственная администрация намерена выделить на эти цели 768 млн. долл., не считая тех средств, которые будут затрачены на программу «Америка 2000». Программами интенсивного обучения на курсах повышения квалификации в стране планируется охватить почти половину всех преподавателей математики и научных дисциплин. Национальный научный фонд приступил к осуществлению специальной государственной инициативы, направленной на систематическое улучшение подготовки учащихся по научным дисциплинам. Однако субсидии, предоставляемые ННФ на эти цели, являются скудными. Они составляют не более 10 млн. долл. на каждый штат на 5 лет. «В

Калифорнии столько же денег отпускается на канцелярские скрепки», — говорит Пайн.

В последние годы конгресс проявлял щедрость в отношении финансирования школьного образования, однако жесткие бюджетные ограничения ставят под сомнение выделение запланированных на этот год средств. По словам Бромли, США расходуют на образование больше денег, чем какая-либо другая страна (за исключением, возможно, некоторых швейцарских кантонов), и если сократить бесполезные расходы на содержание бюрократического аппарата, то можно получить дополнительные средства, достаточные для того, чтобы система школьного образования в стране отвечала новым национальным стандартам.

Однако многие убеждены, что реформа не будет эффективной, если на нее не затратить больших денег. Планируемые федеральными властями расходы на преподавание и обучение в школах математике и научным дисциплинам пока еще составляют менее 8% той суммы, которую планирует израсходовать в следующем году министерство образования на школьное обучение в целом. В перспективе, как говорит Хоффман из Национального научно-исследовательского совета, «потребуется значительное увеличение средств на то, чтобы в системе школьного образования США произошли те существенные изменения, о которых сейчас так много говорят.

Наука и общество

Горяча картошечка

ВТО ВРЕМЯ как некоторые молодые фирмы сосредоточили свое внимание на колоссальных возможностях, открываемых геномным сплайсингом, в области производства лекарств, другие предприниматели увидели в биотехнологии предпосылки второй «зеленой революции». Мелкие начинающие компании, гиганты сельскохозяйственной химии, производители семян и пищевые концерны всерьез занялись получением растений с новыми генетическими свойствами, высоко ценяемыми потребителями и фермерами, — улучшенным вкусом, повышенной питательной ценностью, более длительным сроком годности при хранении, устойчивостью к заболеваниям и пестицидам.

Спустя почти десятилетие после то-

го, как Управление по контролю качества пищевых продуктов, медикаментов и косметических средств США (FDA) выдало первое разрешение на продажу лекарства, полученного путем биотехнологии, продукты питания на базе генетической инженерии еще ждут своего часа. Фирмы, занимающиеся сельскохозяйственной биотехнологией, вынуждены признать: та же самая наука, которая дарит надежду на больничной койке, у кухонного стола вызывает страх. Власти Нью-Йорка публично угрожают бойкотировать то, что один шутник назвал «франкенкормом», а организации, критически относящиеся к генетической инженерии, вроде основанного Джереми Рифкином Фонда экономических тенденций угрожают FDA юридическими санкциями.

Сомнения в безопасности биотехнологических пищевых продуктов на-



ДЖОН К. СОПЕНСОН демонстрирует желтые кабачки фирмы Asgrow Seed Company, в которые введены гены устойчивости к вирусам. (Фотография: Peter Yates.)

чали возникать, когда в мае прошлого года FDA объявило, что генетически модифицированные растения будут в большинстве случаев рассматриваться как обычные сорта, т. е. для новых растений — получены они путем генетической инженерии или методами традиционной селекции — не требуется специального анализа для получения разрешения на продажу. FDA постановило также, что на биотехнологические пищевые продукты не нужно ставить особые товарные этикетки, оговаривающие их необычное происхождение. Однако изменения, приводящие к заметному отклонению свойств продукта от ожиданий потребителя, например высокое содержание волокна в картофеле или низкая концентрация витамина С в апельсинах, требуют определенной информационной маркировки.

Критика сводится к следующему: потребитель должен знать, что он покупает. Ведь, согласно FDA, ответственность за безопасность пищи несут ее производители, а поставщики неапробированной технологии остаются, таким образом, в тени. «FDA рассчитывает, что компании будут обращаться к нему; иначе это учреждение оказывается вообще ни при чем», — заявляет старший научный сотрудник Фонда защиты окружающей среды (EDF) Р. Голдберг.

Эта экологическая группа со штаб-квартирой в Нью-Йорке сформулировала свои собственные предложения относительно правил безопасности и маркировки пищевой продукции, оза-

главив их «Переменчивое угощение: обеспечение безопасности пищи в эру генетической инженерии». «Я вовсе не думаю, что большинство генов опасны, и все же следует ожидать исключений, а не правил», — говорит Голдберг. В EDF особенно обеспокоены растениями, в геном которых введены гены пестицидов; есть также опасение, что перенос генов между организмами повысит риск аллергических реакций. Рифкин планирует сделать особый упор на аллергенность и в своей компании Pure Food («Чистая пища»).

Однако технология введения в организм новых генов позволяет делать то же, чем селекционеры занимались тысячи лет, только быстрее и более целенаправленно. «Модификация отдельных генов на самом деле с меньшей вероятностью ведет к неожиданному появлению отрицательных свойств, чем традиционная селекция, поскольку меняется гораздо меньше генетического материала», — утверждает вице-президент по науке фирмы Calgene в Дейвисе (Калифорния) В. Кнауф.

Уже объявлено, что первый трансгенный овощ появится «на потоке» в середине 1993 г. или в начале 1994 г. Этот сорт помидоров под названием «Flavor Saver» (что можно перевести как «вечно пикантный»), созданный фирмой Calgene, содержит «антисмысловые» последовательности РНК, которые блокируют образование фермента, ускоряющего гниение. В числе других продовольственных культур,

испытываемых сейчас различными компаниями в полевых условиях, — тыква, кабачки, мускусная дыня, огурцы, картофель, кукуруза и такие масличные, как хлопчатник и канола (семя рапса) (см. таблицу на с. 198).

По словам Дж. Соренсона, исполнительного директора по овошеводческим исследованиям фирмы Asgrow Seed Company в Каламазу (шт. Мичиган), за этой первой волной трансгенных растений появится их «более сложное и тонкое второе поколение», которое дойдет до рынка только через 5—10 лет. «Сейчас мы начинаем понимать метаболические основы заболеваний растений и противодействовать этим процессам», — отмечает он. Кроме того, некоторые лаборатории, например Служба сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США (USDA) в Лаббоке (шт. Техас), экспериментируют со специфическими генами, которые, как считается, определяют узкие температурные диапазоны оптимального роста растений. Перенос этих и других признаков, включая устойчивость к засухе, засолению и тяжелым металлам, позволил бы выращивать урожай на землях, считающихся в настоящее время непригодными для земледелия.

Сейчас, когда появились плоды сельскохозяйственной биотехнологии, как фирмы, так и регулирующие организации стремятся успокоить общественность. «Не следует считать, что мы умываем руки и пускаем дело на самотек, — поясняет микробиолог Э. Фламм из отдела биотехнологии FDA. — Просто так получается, что большинство известных нам модификаций с точки зрения здравоохранения не представляют интереса». Хотя, по убеждению регулирующих организаций, трансгенные растения вовсе не обязательно опасны, это отнюдь не означает автоматически, что безвредна и производимая из них пища. По словам Фламма, те же самые юридические основания, что позволяют FDA предотвращать сбыт зараженных «даров моря», можно было бы использовать для запрещения биотехнологических продуктов. «Всем известно: один телефонный звонок — и товар изъят из торговли», — добавляет он.

Чтобы оградить себя от критики, FDA уже выпустило нормативы, касающиеся областей, в которых могут возникнуть проблемы, связанные с трансгенными сельскохозяйственными культурами. Согласно этим рекомендациям, фирмы сначала должны изучить основные характеристики нового вещества. Все, что в принципе сходно с уже входящими в общепринятый рацион белками, жира-

Ответы на вопросы, приведенные на с. 190

1. Если в 11 ч вечера Луна находится на юго-западе прямо над горизонтом, следовательно, 5 ч назад на закате Солнца она была примерно над головой (к югу). Значит, Солнце освещало и продолжает освещать в 11 ч половину видимого лунного диска. Освещенная половина этого диска должна быть справа. Поскольку Луна обращается вокруг Земли в том же направлении, в каком вращается сама Земля, то вечером следующего дня Луна должна быть выше над горизонтом.

2. Поскольку носики обоих кофейников находятся на одном уровне, содержащаяся в них жидкость опустится до одного уровня, а лишняя — вытечет через носики, так как поперечные сечения кофейников одинаковы, в них будет одинаковое количество кофе.

3. Брусочек вытесняет количество воды, вес которой равен весу бруска. Эта вода выльется через край, стало быть, вес стакана с водой в обоих случаях будет одинаковым.

ми и углеводами, как правило, следует признавать безопасным. Однако в некоторых случаях, например когда функция белка неизвестна или необычна, это вещество может квалифицироваться как пищевая добавка. Фламм приводит в пример два подслащивающих агента, которые предполагается получать с помощью трансгенных растений, — тауматин и монеллин; они, вероятно, потребуют именно такого повышенного внимания (в отличие от большинства сладких веществ, относящихся к углеводам, это белки).

Кроме того, Фламм предупреждает, что фирмы должны учитывать и выяснять возможное наличие природных токсинов как в модифицируемом растении, так и в организме, служащем донором генов. Например, селекционеры регулярно проверяют новые сорта таких культур, как кабачки, тыква, сельдерей и картофель, которые потенциально способны производить токсичные метаболиты.

FDA также требует от фирм гарантировать наличие в трансгенных растениях такого же набора питательных веществ, как в традиционных сортах. Особенно строгий контроль должен быть за потенциальными аллергенами. «Согласно нашей концепции, если переносится ген из аллергенного вида, то переносится и аллерген», — заявляет Фламм. По его словам, продуктам, полученным из растений, несущих ДНК пшеницы, орехов, бобовых, молока, яиц, морских ракообразных и моллюсков, необходимо давать специальную маркировку, пока не будет окончательно доказано отсутствие в новой пище «унаследованной» аллергенности.

Некоторые разработчики трансгенных растений не возражают против требования маркировки. Например, фирма Calgene намерена даже подчеркивать происхождение своей продукции, чтобы потребители знали, почему помидоры «Flavor Savor» стоят в 3—4 раза дороже обычных. Однако маркировка таких сельскохозяйственных товаров, как зерновые культуры, была бы затруднительна, как считает менеджер по проблемам биотехнологического регулирования фирмы Du Pont Э. Рейли. «Одно дело — маркировка продукта, поступающего в продажу в неизменном виде, и совсем другое — сырьё для промышленной переработки, скажем, кукурузы», — замечает он. На пути от фермы до потребителя столько грузовиков, элеваторов и котлов, что проследить за превращением трансгенной кукурузы в хрустящие хлопья или масло почти невозможно.

Более того, по мнению технического директора Промышленной биотех-

Основные разработчики пищевых продуктов, получаемых с помощью методов генной инженерии

Asgrow Seed Company (г. Каламазу, шт. Мичиган)

Ведутся полевые испытания желтых кабачков, огурцов и мускусной дыни, несущих гены, обеспечивающие устойчивость к четырем обычным вирусам растений. Для этих культур, а также салата и моркови разрабатываются гены устойчивости к грибкам и бактериям.

Calgene (г. Дейвис, шт. Калифорния)

В 1993 г. в продажу поступают трансгенные помидоры сорта «Flavor Saver», несущие «антисмысловую» РНК, обеспечивающую бланжевоспелость и продлевающую срок годности при хранении. Ведутся испытания канолы (рапсового семени), несущей гены, обеспечивающие синтез лауриновой и стеариновой кислот; предполагается использование в обработке пищевых продуктов и производстве мыла. Канола также генетически модифицируется с целью производства высокогидрогенизированных жиров, входящих в состав маргарина.

DNA Plant Technologies (г. Циннаминсон, шт. Нью-Джерси)

Ведутся полевые испытания помидоров, производящих фермент хитиназу, который служит средством против грибов, вызывающих гниение снятых плодов. Испытываются также помидоры, содержащие фермент, продлевающий бланжевоспелость. Разрабатываются помидоры с «антифризными» генами зимней камбалы. Ведется совместная с фирмой Du Pont разработка канолы, образующей масло с низким содержанием насыщенных жиров, для высокотемпературного жарения.

Monsanto (г. Сент-Луис, шт. Миссури)

С помощью генов почвенных бактерий разрабатываются картофель, мало поглощающий жир при жарении, и помидоры с замедленным созреванием. Разрабатываются картофель и помидоры с генами, обеспечивающими устойчивость к вирусным заболеваниям, а также картофель, защищенный от насекомых. Испытывается устойчивый к гербицидам хлопчатник для производства масла.

Pioneer Hi-Bred (г. Де-Мойн, шт. Айова)

Испытываются подсолнечник и канола с модифицированным содержанием аминокислот для производства масел с повышенной питательной ценностью и пониженным содержанием насыщенных жиров. Разрабатываются соя с высоким содержанием метионина в бобах на корм скоту, кукуруза, устойчивая к насекомым, и люцерна, устойчивая к вирусу люцерновой мозаики.

нологической ассоциации (ИВА) в Вашингтоне А. Голдхаммера, до сих пор не ясно, какого рода информацию хочет видеть покупатель на этикетке биотехнологического пищевого продукта. Интересно ли ему то, что помидор несет гены сои? Или что фермент, называемый полигалактуроназой, блокирован антисмысловой РНК? «Сейчас есть возможность обеспечить безвредность трансгенных растений», — заявляет Голдхаммер. — На научном уровне это легко объяснить; проблема в том, как растолковать это широкой общественности.

Как полагает директор Управления сельскохозяйственной биотехнологии USDA А. Янг, даже Консультативному комитету по исследованиям в области сельскохозяйственной биотехнологии, рассматриваемому заявке на полевые испытания, подаваемые в USDA, потребовалась бы некоторая дополнительная подготовка. «С научной точки зрения ген — это просто функциональная единица, обеспечивающая определенные реакции», — говорит Янг, признавая гораздо большую глубину встающих перед его ведомст-

вом проблем. — Нам нужны действительно светлые головы, которые смогли бы чиновникам правильно реагировать на обеспокоенность общества новинками сельскохозяйственной биотехнологии».

Чтобы сдвинуть дело с места, Янг попросил У. Стивена Берка из Биотехнологического центра Северной Каролины в Ризерч-Трайангл-Парке подготовить пакет основных предполагаемых направлений дальнейшей политики. Используя этот документ, который должен быть представлен ему в марте текущего года, Янг собирается развернуть дискуссию по этическим, личным, культурным и социальным аспектам проблем, связанных с биотехнологическими пищевыми продуктами. Если знания помогают потребителю смириться с мыслью о переносе генов между организмами, значит, просветительские программы по сельскохозяйственной биотехнологии вполне могли бы способствовать ее признанию. Однако логика редко побеждает инстинкт, особенно когда речь заходит о пище.

Дебора Эрикссон



ОКТАБРЬ 1942 г. «Проблемы, с которыми нам придется столкнуться после этой войны, будут носить двойственный характер, — сказал г-н Джеймс Линкольн, президент компании Lincoln Electric. — Во-первых, возникнет крупномасштабная безработица, поскольку, даже если потребность в товарах окажется достаточно велика для того, чтобы занять работой всех людей, переориентация на выпуск мирной продукции займет много времени. Во-вторых, изменится характер конкуренции вследствие того, что накладные расходы финансируемых государством организаций будут меньше, чем у фирм, самостоятельно финансирующих расширение своего производства».

«У мисс М. Ф., 25 лет от роду, уже в течение примерно 10 лет проявлялись симптомы шизофрении, но четкий диагноз ей был поставлен впервые лишь в апреле 1939 г. Ни массажные инъекции инсулина, ни метразол не изменяли ее состояния к лучшему. 29 июля 1940 г. был испробован метод общей гипотермии. Температура ее тела на протяжении 29 часов поддерживалась ниже 98° F и на протяжении 22 часов — ниже 95° F, причем за этот период один раз был достигнут минимум температуры 83°. После курса гипотермии она вернулась домой, как сообщили доктора Джон Тэлботт и Кеннет Тиллотсон из Гарвардской Медицинской школы. В последнем отчете говорилось, что произошла ее успешная социальная реабилитация и был достигнут удовлетворительный уровень социальной адаптации».

«Расщепление атомов с целью высвобождения «шхвала» энергии — занятие довольно прибыльное для газетных репортеров. Однако в физических лабораториях оно не заслужило пока такой репутации. Радиоактивные материалы, которые содержатся в земле лишь в ничтожно малых количествах, расщепляясь, медленно выделяют большое количество энергии. Если бы, например, радий, как и медь, встречался столь же часто, атомные реакторы, в которых радий используется в качестве топлива, могли бы стать практичными, однако радия в природе мало. Что касается искусственного расщепления, то здесь пока, по-видимому, превалиру-

ет явное мнение против таких операций, если речь идет о получении «чистого» выхода энергии. В процесс приходится «вкладывать» гораздо большее количество энергии, чем то, которое можно получить в результате процесса. Есть некоторые основания говорить о том, что имеется изотоп урана, который в сравнительно чистом состоянии мог бы, после бомбардировки его нейтронами, дать чистый выход энергии в довольно большом количестве. Но этот изотоп урана является одним из редчайших из всех редко встречаемых материалов».



ОКТАБРЬ 1892 г. «На протяжении последних пяти-шести лет происходило совершенствование техники дистанционной телефонии. Рассматриваемый метод представляет собой совершенный вид передачи искусственной речи на расстоянии в одну тысячу миль и более. Нас пригласили присутствовать на первой публичной демонстрации этого изобретения, состоявшейся в полдень 18 октября в главной конторе Отделения дистанционной связи Американской телефонной и телеграфной компании в Нью-Йорке. Следует заметить, что важный элемент успеха дистанционной телефонии заключается в улучшенной конструкции батареи, применяемой теперь для питания передающего устройства. Эта батарея обладает тем достоинством, что благодаря ей на протяжении продолжитель-

ного периода времени поддерживает высокую и почти равномерную электродвижущую силу».

«Из журнала «La Nature»: «Дрожательный паралич, также называемый болезнью Паркинсона, представляет собой болезненное нервное расстройство, которое лишает несчастных сна и отдыха. Профессор Шарко много лет назад узнал от нескольких больных, страдающих этой болезнью, о том, что они получают заметное облегчение от длительных поездок по железной дороге или в экипаже. Поэтому г-н Шарко сконструировал кресло, которому посредством электрической лебедки сообщалось попеременное движение вперед и назад. Ничего более невыносимого для здорового человека, чем такие толчки, нельзя было и придумать; они буквально ломали его, приводили в полное расстройство и вытряхивали все внутренности, и через полминуты после начала такого эксперимента он начинал просить пощады. Больной же, наоборот, усаживался в это кресло, как будто садился на мягкий диван. Чем дольше он трясся на нем, тем лучше себя чувствовал. Несколько лет назад данный метод был чрезвычайно успешно усовершенствован д-ром Жилем де Ла Туреттом, учеником г-на Шарко. Он сконструировал аппарат, предназначенный для лечения мигреней и головных болей нервного происхождения; аппарат представляет собой вибрационный шлем (см. рисунок). На этом шлеме имеется небольшой электродвигатель переменного тока, совершающий 600 оборотов в минуту. Через несколько минут больной ощущает некоторую усталость и его начинает клонить ко сну».



Вибрационный шлем Туретта

Нейроны для компьютеров



ДРЮ ВАН КЭМП

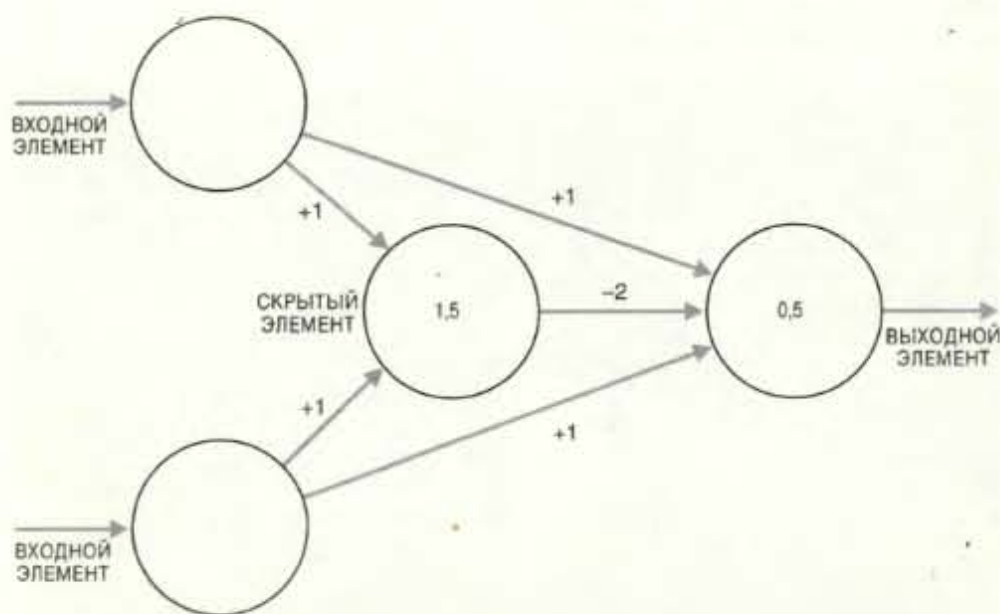
ИСКУССТВЕННЫЕ нейронные сети — это компьютерные модели, построенные по аналогии со структурой и поведением реальных нейронов. Подобно мозгу, они способны распознавать образы, обрабатывать данные и, что самое интересное, обучаться. Искусственные сети состоят из объектов, называемых элементами, которые представляют тела нейронов. Элементы соединяются между собой связями, которые работают как аксоны и дендриты. Связь умножает выход элемента на весовой фактор — величину, аналогичную силе соединения синапса. Затем связь передает значение взвешенного выхода другому элементу, который суммирует все значения, переданные ему другими входными связями. Если суммарное входное значение превышает некоторый порог, то элемент срабатывает.

Изменения в закономерностях срабатывания собственно и составляет обучение. Принято считать, что в реальных нейронах обучение имеет место в синапсах: когда сила соединений

между синапсами изменяется, механизм срабатывания в сети также меняется. В искусственных сетях обучение происходит в тот момент, когда изменяются весовые факторы на связях (см. статью Дж. Хинтона «Как обучаются нейронные сети», с. 103).

Искусственные нейронные сети состоят из трех типов элементов. Входные элементы принимают информацию из окружающего мира. Выходные элементы посылают сигналы, видимые во внешнем мире. Скрытые элементы занимают промежуточное положение между входными и выходными элементами; они не получают непосредственно информации извне и не производят видимых выходных сигналов.

Ниже приведена иллюстрация простой сети. Числа на элементах обозначают пороговые значения, а те, что проставлены на соединительных линиях, обозначают веса. Отметим, что в этой схеме допускаются короткие пути: некоторые входные соединения могут обходить стороной скрытые элементы.



ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ представляет собой вентиль «исключающее или» (XOR): выходной элемент срабатывает только тогда, когда на входной элемент подается 1. Числа, проставленные на соединениях, — это веса, а находящиеся внутри элементов, — пороговые значения.

Если на один входной элемент подается 1, а на другой 0, то на выходе скрытого элемента будет $(1 \times 1) + (0 \times 1) = 1$. Но поскольку это число меньше порогового значения, то скрытый элемент не сработает (другими словами, на выходе у него будет 0). Сигнал, поступающий на выходной элемент, будет равен $(1 \times 1) + (0 \times (-2)) + (0 \times 1) = 1$, что превосходит пороговое значение 0,5. Поэтому выходной элемент сработает.

Возможно, вы узнаете в этой логической схеме вентиль «исключающего или» (XOR). А именно, если хотя бы на один входной элемент подается 1, то на выходе сети мы также будем иметь 1. В противном случае на выходе будет 0 — то есть сеть не сработает. Вы можете сами убедиться в том, что три другие возможные комбинации входных сигналов также дают результаты, характерные для вентиля XOR.

То, что мы можем смоделировать логический вентиль XOR с помощью искусственной нейронной сети, не выглядит чем-то удивительным. Путем тщательного подбора весов и порогов в достаточно сложной сети можно смоделировать любую логическую функцию. Удивительно то, что, располагая такими сетями, вы можете не заниматься подбором весов и порогов. В нашем случае с вентиляем XOR мы могли бы начать с любого веса и порога. Затем, после того как сети были бы многократно показаны различные комбинации (паттерны) входных сигналов, она в результате обучения сама бы пришла к весам, необходимым для реализации вентиля XOR. Что еще интереснее, сеть способна обобщать результаты обучения. На больших наборах данных она может распознавать паттерны, с которыми не сталкивалась ранее.

Чтобы создать такую сеть, нам потребуется внести некоторые модификации в наши искусственные нейроны. Во-первых, математический аппарат, применяемый для обучения сети, значительно упростится, если нам не нужно будет в процессе обучения менять ни веса, ни пороги. На самом деле это сделать несложно. Любой элемент с положительным порогом T и определенным числом n входных связей можно заменить элементом с нулевым порогом и $n + 1$ связью, где дополнительная связь имеет вес $-T$ и выходит из элемента, который всегда срабатывает (т. е. имеет выход 1). Этот трюк называется смещением. В искусственные нейронные сети часто вводится смещенный элемент, обычно соединенный с каждым элементом сети, что позволяет заменить порог весом. Представление выхода элемен-

та в виде сигма-функции также упрощает математику. Сигмоидальная кривая является гладкой аппроксимацией пороговой функции.

Хотя существует несколько способов обучения сети, я выбрал метод, принадлежащий частному классу алгоритмов, который называют контролируемым обучением (к другим типам относятся неконтролируемое обучение и обучение с подкреплением). При контролируемом обучении веса сети подбираются таким образом, чтобы выходы сети изменялись в сторону желаемых выходов. Одним из наиболее успешных методов обучения этого типа является алгоритм обратного функционирования.

В статье Хинтона содержится более подробное описание метода. Вкратце для тех, кто терпимо относится к элементам интегрального и дифференциального счисления: вы берете производную от функции, чтобы найти направление, которое минимизирует ошибку сети. Функция, которая чаще всего выбирается в качестве мерила ошибки, — это сумма квадратов ошибок по выходным элементам. В тексте, заключенном в рамку справа, приводятся уравнения и указана последовательность шагов, необходимых для реализации алгоритма обратного функционирования.

Моей первой реализацией была сеть, работающая в качестве автоматического шифратора. Подобные устройства не требуют большого числа линий, необходимых для передачи информации. Представим, например, сеть с четырьмя входными элементами, двумя скрытыми и четырьмя выходными элементами (шифратор 4-2-4). Когда на сеть поступает какой-либо паттерн сигналов, все четыре входных значения должны быть скомбинированы в двух скрытых элементах. Затем эти два значения должны суметь воспроизвести исходный паттерн посредством четырех значений выходных элементов. Таким образом, весь входной паттерн из четырех значений должен кодироваться двумя скрытыми элементами.

Заметим, что в шифраторе 4-2-4 каждый вход соединяется с каждым скрытым элементом. Аналогичным образом, каждый скрытый элемент соединяется с каждым выходным элементом. Смещенный элемент соединен со всеми скрытыми и всеми выходными элементами (нет необходимости соединять его с входными элементами, поскольку они будут лишь воспроизводить входные сигналы. У каждого из четырех паттернов, распознаванию которых я хотел научить сеть, один входной элемент должен срабатывать, а три других — нет.

Обучение искусственной нейронной сети

Сеть обучается путем многократного повторения задачи, совершая все меньшие ошибки на каждой последующей итерации. Чаще всего в качестве критерия ошибки используется функция суммы квадратов ошибок по всем выходным элементам:

$$E = 1/2 \sum (y_i - d_i)^2.$$

Переменная d_i — желаемый выход элемента i , а y_i — его действительный выход, где y_i — сигма-функция $1/(1 + e^{-x})$. Чтобы минимизировать ошибку, возьмем производную от ошибки по w_{ij} , весу связи между элементами i и j :

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = y_i y_j (1 - y_j) \beta_j,$$

где $\beta_j = (y_j - d_j)$ для выходных элементов и $\beta_j = \sum_k w_{jk} y_k (1 - y_k) \beta_k$ для скрытых элементов (k представляет число элементов в следующем слое по отношению к элементу j). Заметим, что $y_j(1 - y_j)$ — это производная от сигма-функции (см. рисунок на с.202).

Как нетрудно убедиться, ошибку можно вычислить непосредственно для связей, ведущих к выходным элементам. Однако для скрытых элементов производная зависит от значений, вычисленных на всех слоях, следующих за ними. Таким образом, величина β должна быть прослежена в обратном направлении по сети для того, чтобы можно было вычислить производную.

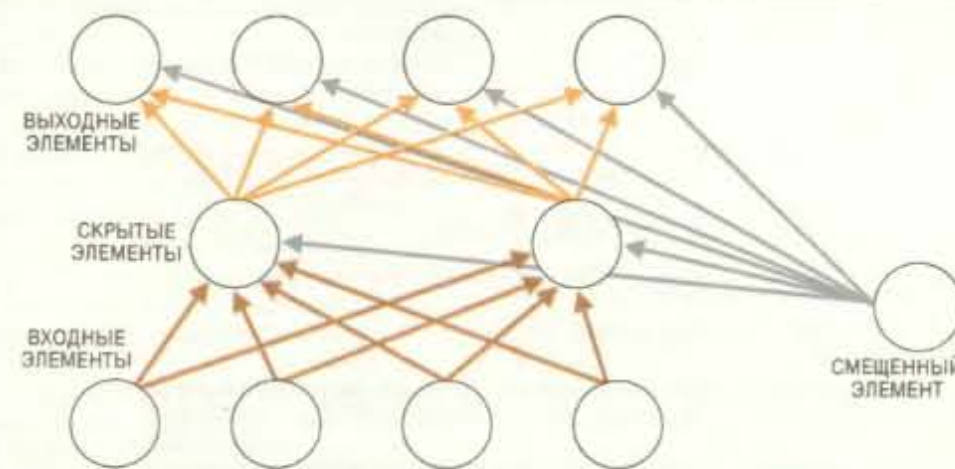
Воспользовавшись этими уравнениями, мы можем сформулировать алгоритм обратного прослеживания следующим образом:

- * Выбрать размер шага δ (для изменения весов)
- * Пока сеть не обучится,
 - * Для каждого образца входных сигналов,
 - * Прodelать проход вперед по сети, порождая выходное сочетание.
 - * Для всех выходных элементов вычислить $\beta_j = (y_j - d_j)$.
 - * Для всех остальных элементов (от последнего слоя к первому) вычислить β , воспользовавшись расчетами на следующем слое:

$$\beta_j = \sum_k w_{jk} y_k (1 - y_k) \beta_k.$$

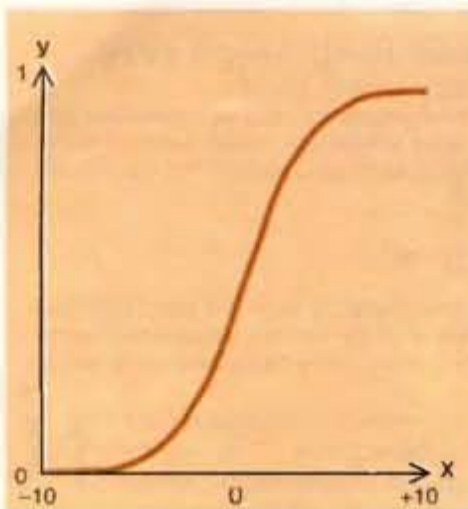
- * Для всех весов в сети изменить вес на величину

$$\Delta w_{ij} = -\delta y_i y_j (1 - y_j) \beta_j.$$



ВХОДНЫЕ ПАТТЕРНЫ	ВЫХОДЫ СКРЫТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	РЕАЛЬНЫЕ ВЫХОДЫ
1 0 0 0	0,03 0,97	0,91 0,10 0,00 0,07
0 1 0 0	0,98 0,96	0,07 0,88 0,06 0,00
0 0 1 0	0,91 0,02	0,00 0,10 0,91 0,06
0 0 0 1	0,03 0,07	0,07 0,00 0,09 0,90

СЕТЬ-ШИФРАТОР 4-2-4 сжимает входные паттерны. После тренировочного периода сеть точно воспроизводила входные паттерны, представляя их по существу в двоичном коде (что выясняется при рассмотрении скрытых элементов).



СИГМА-ФУНКЦИЯ, определенная уравнением $y = 1/(1 + e^{-x})$, дает почти такой же выход, как и обычная пороговая функция (ступенька), но математически проще. У нее есть производная $dy/dx = y(1 - y)$.

Прежде чем начать процесс обучения, я присвоил случайно выбранные значения в диапазоне между -1 и 1 начальным весам. Когда я представил этой необученной сети четыре паттерна сигналов, суммарная ошибка (значение E) варьировала между тремя и четырьмя (в зависимости от начальных весов).

Обучение сети состояло в многократном предъявлении ей различных паттернов и регулировании весов после каждого предъявления. В решил, что сеть достигла приемлемого уровня работы, когда суммарная ошибка на четырех паттернах стала меньше 0,1. Пользуясь этим критерием, я установил, что для успешного обучения требовалось от 800 до 2000 сеансов предъявления в зависимости от шага δ для изменения весов. На самом деле один из наиболее коварных моментов в обучении сети как раз и заключался в подборе δ . Если выбран-

ное значение слишком мало, требуется слишком много времени для сходимости. Если же значение слишком велико, поведение сети становится нестабильным и процесс может никогда не сойтись. Методом проб и ошибок я пришел к значению 0,5. Хотя сеть и не обучалась быстро, но зато «не сходила с ума».

После того как сеть была обучена, я решил взглянуть, каким внутренним паттерном она пользовалась для кодирования предъявляемых ей сочетаний сигналов. Оказалось, что скрытые элементы содержали такие значения, как 0,03; 0,97; 0,98 и 0,07. По существу сеть выработала двоичное представление для поступающей в нее информации.

Наконец я решил построить сеть, которая должна была обучаться арифметике, а именно сложению двух трехбитовых двоичных чисел. Входом сети должны были быть шесть двоичных битов, обозначающие два складываемых числа, а выходом — четыре двоичных разряда их суммы (четвертый разряд необходим в том случае, если при сложении возникает перенос).

Прежде чем приступить к созданию этой сети, я разработал обучающий набор из 64 паттернов. Чтобы убедиться, что представления чисел в трехбитовой форме были правильными, я написал короткую программу, которая вычисляла результаты и их представление для всех тренировочных паттернов. Затем мне предстояло выбрать архитектуру сети. Здесь я также решил воспользоваться одним скрытым слоем, но не знал, из скольких элементов он должен был состоять. Это затруднение было связано с проблемой, часто возникающей при обучении искусственных нейронных сетей: результаты их работы с тренировочными наборами данных всегда постоянно улучшаются (при условии что процедура модификации весов стабильна). Однако при предъявлении комбинаций, не входящих в тренировочный паттерн, система вначале улучшает показатели в работе с ними, а затем начинает ухудшать их.

Это явление называется перетренировкой. Оно возникает после того, как система усвоила некоторые общие правила при работе с данными. По мере того как вы тренируете систему, она все больше узнает об аномалиях в тренировочном наборе. Впоследствии она пытается обобщить эти аномалии и на другие данные и в результате дает большую ошибку.

Чтобы избежать серьезной перетренировки, количество весовых параметров в сети должно быть намного меньшим по сравнению с числом битов, необходимых для описания

желаемого выхода для всех тренировочных примеров. В случае с двоичным сложением число весов должно быть много меньше 256 (64 паттерна, помноженные на 4 бита в представлении каждого результата). Воспользовавшись этим эмпирическим правилом, я решил применить схему с 15 скрытыми элементами, шестью входными, четырьмя выходными и одним смещенным элементом, всего со 169 соединениями. Для обучения этой сети потребовалось значительно больше времени по сравнению с предыдущими. В общей сложности пришлось проделать более 300 000 итераций.

Убедившись, что сеть поддается обучению, я попытался сделать нечто другое. Удалив 4 паттерна из тренировочного набора данных, я сделал случайными веса и переобучил систему на оставшихся 60 паттернах. После того как сеть была обучена, я опробовал ее на четырех паттернах, которые ей никогда не предъявлялись. Она дала правильные результаты и для этих че-

тырех паттернов. Таким образом, сеть научилась выполнять двоичное сложение.

Существует много подходов, позволяющих повысить скорость обучения сети. В частности, можно воспользоваться более сложными методами при выборе направления изменения весов или применить линейный поиск, чтобы определить величину шага для такого изменения. Существует также много более сложных алгоритмов, которыми можно воспользоваться, включая конструктивные алгоритмы, добавляющие новые скрытые элементы в процессе обучения.

Если вы хотите получить экземпляр программ шифратора (написанной на языке ANSI C), вышлите отформатированный дискет двойной плотности 3,5 или 5,25 дюйма с маркой для оплаченного возврата на адрес: The Amateur Scientist, Scientific American, 415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111.

ниями, называемыми также «линиями обычного приветствия» и соединяющими исполнителей программ с внешним миром. Персонал, пользующийся такой телефонной линией, обязан «отвечать установленным приветствием, например: «Доброе утро» или «Привет!». Упоминать название компании в телефонном разговоре запрещается».

Стивен Афтергуд из Федерации американских ученых, который опубликовал дополнение, открыто заявил, что его шокирует политика сокрытия правды, которую он называет «официально санкционированной ложью». «Можно представить себе ситуацию, когда такую ложь можно оправдать, например, во время войны, — заявил он. — Но в других случаях я не могу признать такую политику оправданной. Нет сомнения, что эта опасная политика, поскольку она может подорвать доверие к официальным заявлениям государственных деятелей».

Сьюзен Хансен, представитель Пентагона, сетует на разглашение информации, содержащейся в этом документе, поскольку он засекречен. «Кто бы его вам ни прислал, он не мог быть уполномоченным на это, — заявила она. — Документ является неофициальным проектом, не отражающим политику федерального правительства».

Не является ли само это заявление фактом сокрытия истины? Судя по словам сотрудника аппарата сената, специалиста по обеспечению неразглашения государственных тайн, администратор Буша уже проводит курс на сокрытие правды от общественности, укрепив ряд комитетов конгресса, призванных осуществлять надзор за соблюдением секретности государственной информации. Администрация, как заявил государственный служащий, консультировалась с конгрессом, прежде чем распространить ложные версии относительно нескольких «первоочередных программ» через средства массовой информации. Какие же это были версии? «Извините, не могу вам сказать» — было его ответом.

Тот же чиновник из аппарата сената отмечает, что конгресс, хотя он и дает свои согласия на ложные версии, когда, по его мнению, это в интересах безопасности государства, сам он не принимает прямого участия в обмане. Действительно, конгресс старается снизить потребность в таком обмане путем сокращения числа не подлежащих разглашению программ до минимума. «В условиях демократии ложь, скрывающая истину, — явление крайне нежелательное», — заявил он.

Джон Хорган

Параметры сети и структуры данных

```

/*Параметры сети*/
#define NUM_INPUT 4 /*число входных элементов*/
#define NUM_HIDDEN 2 /*число скрытых элементов*/
#define NUM_OUTPUT 4 /*число выходных элементов*/
#define NUM_BIAS 1 /*число смещенных элементов*/
#define STEP_SIZE 0.5 /*размер шага изменения весов*/

/*Структуры данных сети:
Unit, Net*/
typedef struct Unit {
    double input; /*суммарный вход*/
    double output; /*суммарный выход (выход через сигма-функцию)*/
    double target; /*желаемый выход (для выходных элементов)*/
    double beta; /*производная ошибки (прослеженная назад)*/
} Unit;
typedef struct Net {
    Unit input [NUM_INPUT]; /*слой входных элементов*/
    Unit hidden [NUM_HIDDEN]; /*слой скрытых элементов*/
    Unit output [NUM_OUTPUT]; /*слой выходных элементов*/
    Unit bias [NUM_BIAS]; /*слой смещенных элементов*/
} Net;

/*Соединения между слоями (отметьте порядок индексации)*/
double i2h[NUM_HIDDEN][NUM_INPUT]; /*входные скрытым*/
double h2o[NUM_OUTPUT][NUM_HIDDEN]; /*скрытые выходным*/
double b2h[NUM_HIDDEN][NUM_BIAS]; /*смещенные скрытым*/
double b2o[NUM_OUTPUT][NUM_BIAS]; /*смещенные выходным*/
FILE *fpPatterns; /*циклический файл сочетаний*/
double error; /*ошибка сети*/

/*Полезные макросы: sigmoid(производная), random, square*/
#define sigmoid(x) (1.0/(1.0 + exp(-double)(x)))
#define sigmoidDerivative(x) ((double)(x) * (1.0 - (x)))
#define random(x) ((double)rand()/(RAND_MAX))
#define square(x) ((x) * (x))

```

Наука и общество

Ложь ради спокойствия?

СКРЫТНОСТЬ со стороны официальных государственных деятелей существует, пожалуй, с тех пор, как появились правительства. Не является исключением и Вашингтонская администрация, лицемерие которой стало традиционным. Так, в 50-е и 60-е годы самолеты американских ВВС с биологическим оружием на борту выполняли учебные полеты над американскими и канадскими городами, разбрасывая над ними живые, хотя, возможно, и безвредные, бактерии. Если бы в то время местные официальные лица спросили у военного ведомства, что означают эти полеты, оно ответило бы, что проводятся испытания ложной «мякны», отражающей сигналы радиолокаторов.

Может показаться, что такое увиливание от прямого ответа (независимо от того, оправдано оно или нет) обусловлено стремлением сохранить общее спокойствие и не навлекать на себя беду. Такая ситуация, возможно, была допустимой в прошлом, но не теперь. Администрация Буша составила проект документа, регулирующего использование обмана с целью сокрытия действий, предпринимаемых в рамках секретных программ. Страсть чиновников к секретности, как представляется, уступает только

их страсти к пересмотру законов.

Упомянутый документ является составной частью «Руководства к Национальной программе обеспечения безопасности промышленности», которое устанавливает меры, гарантирующие безопасность правительственных учреждений и организаций, задействованных в выполнении секретных программ. Министерство обороны США недавно разработало дополнение к этому руководству, касающееся программ «ограниченного доступа» (называемых также «черными» программами), о существовании которых невозможно даже догадаться. В этом дополнении, датированном 29 мая 1992 г., с пометкой «проект» говорится:

«Ложные сведения могут быть даны в отношении никому не известных программ с целью сохранения их в тайне от лиц, которым знать о них не положено. Ложные версии должны выглядеть правдоподобными и не раскрывать никаких сведений относительно истинного содержания контракта. Ложные версии в отношении программ ограниченного доступа должны предварительно согласовываться с лицом, ответственным за обеспечение секретности программ».

В дополнении также указывается, что программы ограниченного доступа должны обеспечиваться «ничем не выделяющимися» телефонными ли-

Убийство в Гастлей-Грендж



ЯН СТУАРТ

ЗА ОКНАМИ дома 221В по Бейкер-стрит вечерело. Холмс играл на скрипке Ирландскую рапсодию, когда я был вынужден прервать его.

— Холмс, мы только что получили письмо, безотлагательно требующее вашего внимания.

— Пожалуйста, прочтите мне его, Watson.

— Письмо отправлено из Гастлей-Грендж в Гримли-Синистер:

«Дорогой мистер Холмс!

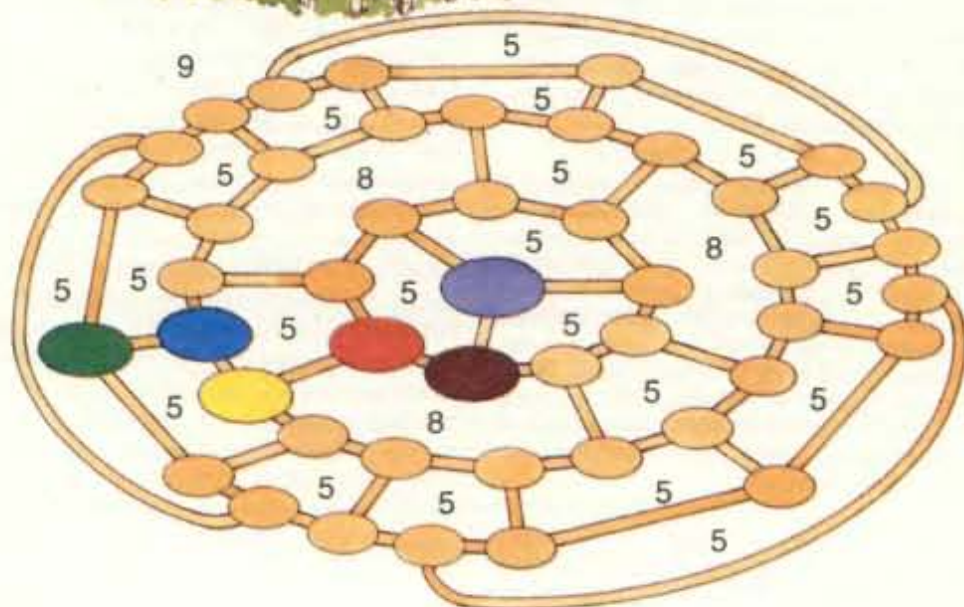
У нас произошло ужасное убийство. Мисс Мельпомена Битрут был нанесен смертельный удар тяжелой люстрой. Полиция в затруднении. Пожалуйста, помогите нам раскрыть это кошмарное преступление.

Корнелиан, граф Гастлей».

— Watson, нельзя терять ни минуты. Пакуйте чемоданы и ловите извозчика, чтобы подкинул нас до вокзала. Это необычайное преступление станет настоящей проверкой для на-



- ПРИВРАТНАЯ БАШНЯ
- БАШНЯ ГЕРЦОГА ГАСТЛЕЯ
- БАШНЯ ЛЕДИ ГАМБОДЖ
- КРАСНАЯ БАШНЯ
- БАШНЯ С КОМНАТОЙ БИТРУТ
- БАШНЯ ГЕРЦОГИНИ АМАРАНТ



ших мозгов. Придется напрячь их до предела, это несомненно.

Прибыв в расположенную неподалеку деревню Гримли-Синистер, мы с Холмсом сразу увидели Гастлей-Грендж. Старый замок имел 46 башен, расположенных по трем концентрическим окружностям, и одну центральную башню. Они были связаны между собой узкими проходами на высоте нескольких этажей. Единственный видимый вход в замок находился за подъемным мостиком, ведущим к самой западной башне (см. рисунок внизу).

У входа нас встретил лакей, который назвался Даннетом. Он провел нас по винтовой лестнице, а затем по переходу к соседней башне, где нас приветствовал граф Гастлей.

— А, мистер Холмс, — воскликнул граф, — не могу выразить, как я вам благодарен.

— Не стоит благодарности.

— Убийство произошло в комнате мисс Битрут. Хотите осмотреть место преступления?

— Одну минуту, ваша светлость, я должен сначала послать телеграмму.

— Даннет позаботится об этом, мистер Холмс. Мы подождем — это не займет много времени.

Вскоре лакей вернулся.

— Следуйте за мной, господа, — сказал граф. — Каждая башня Гастлей-Грендж представляет собой одну большую комнату, и в каждой из них обитает один из ныне живущих потомков рода Гастлей.

Они вошли в башню мисс Битрут.

— Вот здесь и было совершено это низкое преступление, — сказал со вздохом граф. — Тут висела большая люстра со свечами, закрепленная на потолке, но преступник каким-то образом умудрился открепить ее, а бедная Мельпомена спала прямо под нею.

— Кто нашел тело? — спросил я.

— Я нашел, сэр, — ответил лакей.

— То, что осталось от него, сэр.

— Значит, вы были последним, кто видел мисс Битрут живой?

— Если не считать убийцу, то да.

Я заметил, как Холмс, обшаривавший комнату с лупой в руках, вдруг остановился и стал внимательно слушать.

— Боюсь, что мы не найдем здесь улики, Watson, — сказал он. — Полиция уже побывала тут и проявила слишком большое усердие, перевернув все вверх дном. — Сказав это, он

ГАСТЛЕЙ-ГРЕНДЖ — место преступления. Мисс Битрут была убита в своей комнате. Числа означают количество переходов, ограничивающих каждую область.

осмотрелся. — В чью башню ведет эта дверь?

— В башню графини Амарант, — сказал Даннет.

— Могла она быть убийцей?

— У Даннета единственный набор ключей, — сказал граф. — Они очень сложной формы, и я полагаю, что никому не удалось бы изготовить такие же. Однако в любом случае графиня страдает почти полной глухотой и большую часть времени проводит в постели.

Холмс кивнул.

— Все ли были в своих комнатах в ночь, когда произошло преступление?

— Почти наверняка, — вздохнул граф. — Согласно завещанию моего деда, каждый, кто живет в замке, ночью должен быть в своей комнате. Он очень боялся одиночества, поэтому в завещании потребовал, чтобы каждый из его потомков проводил все ночи в Грендже или отказался от своей доли фамильного состояния.

— Это действительно так, сэр, — сказал Даннет. — Каждый вечер я проверяю все башни по очереди и запираю все промежуточные двери. По утрам я опять делаю обход и снова отпираю их. В то ужасное утро я постучал в дверь мисс Битрут. Не услышав ответа, я почувствовал что-то неладное и открыл дверь. Тогда я и увидел ...

— И никто не приезжал и не покидал Гастлей-Грендж в течение ночи?

— Нет, сэр. Этого никак не могло быть, сэр. Единственный способ покинуть помещение — это пройти через все соседние башни, пока не дойдешь до входной башни, где я провожу каждую ночь. Я могу подтвердить, что никто в ту ночь не входил и не выходил.

— И все обитатели башен были в добром здравии, когда вы их запирали?

— Да, сэр. У них у всех есть веревочки, ведущие к колоколу в башне графа, и, как только я их запираю, они звонят, сэр, чтобы подтвердить свое присутствие.

— Я пользуюсь этими сигналами, чтобы убедиться, что все обитатели замка выполняют условия завещания, — сказал граф. — Даннет прав. Я веду строгий учет, и из всех башен были сигналы.

— Но колоколом мог легко воспользоваться посторонний, — возразил я.

— Нет, доктор Watson, — ответил граф. — У каждого обитателя есть свой код, известный только ему и мне.

Холмс повернулся к Даннету.

— Вы не входили ни в одну комнату

больше одного раза?

— О нет, мистер Холмс, — воскликнул лакей. — Во время своих обходов я захожу лишь один раз в каждую башню, это нерушимое правило. После того как дверь башни заперта, я не имею права беспокоить ее обитателя или обитательницу.

Холмс попытался изменить ход расследования.

— Скажите, граф, полиции удалось установить время смерти?

— Это было невозможно сделать, мистер Холмс, из-за состояния, в котором находилось тело. По степени сворачиваемости крови они считают, что смерть наступила, вероятно, до полуночи.

Холмс нахмурил брови.

— Существует ли какой-то другой способ пройти между башнями, кроме этих высоких переходов?

— Опытный скалолаз, возможно, сумеет взобраться по стенам с земли. Однако, мистер Холмс, он никогда бы не смог сделать этого ночью. Семья Гастлей очень серьезно относится к вопросам безопасности. Последнее, что делает Даннет во время своих ночных обходов, — выпускает свору сторожевых собак на территорию замка.

Прибыл мальчик почтальон с телеграммой для Холмса — несомненно, в ответ на его недавнее послание. Когда он читал ее, я заметил, как он прищурился.

— По какому маршруту вы делаете свои обходы, Даннет?

— Как когда, сэр.

— Не могли бы вы вспомнить ваш маршрут вечером в день убийства?

— Нет, сэр.

— Очень жаль, — Холмс грустно покачал головой. — Watson, следует позаботиться о ночлеге. Здесь нам больше нечего делать.

— Позвольте, мистер Холмс, а как же убийство ...

— Я не сказал, ваша светлость, что не могу раскрыть преступление. Я лишь заметил, что мое расследование здесь завершилось. Нам с мистером Watsonом предстоит еще немного поработать, после чего, насколько не сомневаюсь, я назову преступника. Даннет, закажите нам экипаж.

Мы с Холмсом остановились в уютном трактире деревни Гримли-Синистер.

— Холмс, вы действительно верите в то, что сказали графу? Будто вы уверены, что назовете преступника?

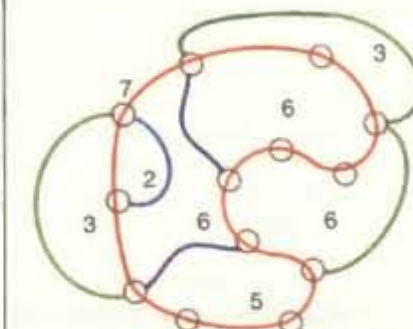
— Watson, с каких это пор я обманываю графов?

— Но мы мало чем располагаем.

— Чепуха, Watson! Давайте-ка подытожим, что у нас имеется. Мисс Битрут была убита до полуночи.

Формула Гринберга

Изображенная здесь сеть имеет 13 узлов, соединенных 19 путями. Замкнутая линия (красная) проходит через каждый узел сети ровно один раз. Такой маршрут называется циклом Гамильтона. Пути, не включенные в цикл, можно рассматривать как внутренние диагонали (синие) или внешние диагонали (зеленые). Контур цикла и диагонали образуют несколько областей, каждая из которых имеет некоторое число сторон.



Если f_j — число областей внутри контура, имеющих j сторон, то $f_2 = 1$, $f_5 = 1$ и $f_6 = 2$. Аналогичным образом если g_j — число областей вне контура, имеющих j сторон, то $g_3 = 2$, $g_6 = 1$ и $g_7 = 1$. Поскольку сеть содержит цикл Гамильтона, она должна удовлетворять условию Гринберга, которое в данном случае принимает вид

$$(f_3 - g_3) + 2(f_4 - g_4) + 3(f_5 - g_5) + 4(f_6 - g_6) + 5(f_7 - g_7) = 0.$$

Если подставить значения f_j и g_j в левую часть уравнения, то в результате мы получим

$$(0 - 2) + 2(0 - 0) + 3(1 - 0) + 4(2 - 1) + 5(0 - 1),$$

что действительно равно 0.

Никто из посторонних не мог войти или выйти из замка из-за собак. Поэтому убийца был одним из обитателей Гастлей-Грендж. Даннет запер их каждого в своей комнате, и они подтвердили свое присутствие графу сразу после этого. Даннет вышел из входной башни и вернулся в нее, входя в каждую башню ровно один раз. После того как двери были заперты, единственными обитателями, которые могли незаметно войти в комнату мисс Битрут, были ее непосредственные соседи. Но для этого им надо было иметь ключ, а у Даннета только один набор. Ключи невозможно ско-

пировать. Кто же тогда мог совершить убийство?

— Ну конечно же, Даннет! Он мог вернуться в комнату после того, как мисс Битрут позвонила в колокольчик, чтобы сообщить, что она на месте.

— Вот именно. Граф сказал нам, что графиня Амарант, чья комната находится по соседству, глуха как тетерев и спит как бегемот. Даннет мог подождать в комнате графини, пока мисс Битрут позвонит, а затем вернуться, чтобы убить ее.

— Люстрой?

— Он убил ее каким-то другим орудием, куском трубы, может быть, а потом подстроил падение люстры, чтобы уничтожить улики.

— Интересная теория, — сказал я ему.

Он кивнул головой.

— Но пока это только теория, Ватсон. Как мы докажем, что Даннет — убийца? Графиня Амарант спала, когда он зашел к ней вторично, и затем он мог продолжать свой обход, как ни в чем не бывало.

— Грохот от падения люстры, наверняка, должен был разбудить кого-нибудь...

— Башни изолированы друг от друга. Нет, никто ничего не мог услышать.

— Даннет задержался бы дольше обычного во время своего обхода.

— Всего на каких-нибудь несколько минут, если заранее ослабил крепление люстры. Этого недостаточно, чтобы привлечь внимание.

В отчаянии я ударил себя по лбу.

— Тогда мы проиграли, Холмс. Это сделал не кто иной, как Даннет, но этот мерзавец останется на свободе.

Холмс рассмеялся.

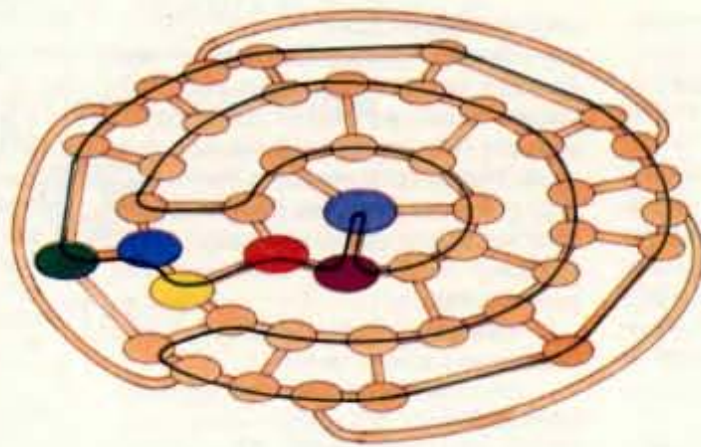
— Ни в коем случае, Ватсон. Если нам повезет, то он, может быть, еще сам себя выдаст.

Он протянул мне листочек бумаги. На нем была нарисована карта Гастлей-Грендж.

— Ватсон, предлагаю вам решить простую задачу. Даннет утверждает, что во время своих вечерних обходов он посещает каждую башню один и только один раз. Он не мог перейти из одной башни в другую никаким другим путем, кроме как по переходам. Может быть, вы найдете мне такой маршрут?

— Конечно, Холмс, здесь, должно быть, сотни возможных решений.

— На самом деле, Ватсон, я подозреваю, что не найдется и одного. Я



ДАННЕТ не может посетить все башни Гастлей-Грендж, ни разу не проходя в обратном направлении. Он обязательно должен войти хотя бы в одну башню дважды.

попросил вас найти Гамильтоновский цикл: замкнутый путь по сети, при прохождении которого каждый узел посещается ровно один раз. Он назван так в честь сэра Рауэна Гамильтона, который сформулировал эту задачу на ребрах икосаэдра. Не существует надежного метода, кроме систематических проб и ошибок, который позволил бы определить, имеет ли сеть Гамильтоновский цикл.

— В таком случае Даннет проведет нас, потому что сеть слишком велика, чтобы проанализировать ее методом проб и ошибок.

— Не обязательно, Ватсон. Я надеюсь, что в данном случае нам повезет. Не так давно я прочел о замечательной работе русского математика Е. Гринберга. Он вывел условие, которому должна удовлетворять любая сеть на плоскости, чтобы у нее существовал цикл Гамильтона. Мы увидим, удовлетворяют ли этому условию башни Гастлей-Грендж. Пожалуйста, проверьте мои рассуждения, Ватсон.

— Я постараюсь, Холмс.

— Представьте себе сеть, которую можно изобразить на плоскости, это очень важно, Ватсон. Хотя переходы в Гастлей-Грендж расположены высоко, они не пересекают друг друга. Пусть эта сеть состоит из n узлов и некоторого числа путей, соединяющих эти узлы (см. текст в рамке на с. 205). Предположим, что эти узлы соединены циклом Гамильтона...

— Другими словами, — прервал я его, — вы имеете в виду, что существует замкнутый путь, который проходит через каждый узел сети только один раз.

— Совершенно верно. А если это так, то мы можем вывести некоторые свойства, присущие этой сети. Во-первых, нам известно, что цикл

Гамильтона содержит n ребер, поскольку каждый узел «посещается» только один раз. Соединения, не принадлежащие циклу, проходят «по диагонали» либо внутри, либо вне контуров цикла. Внутренняя часть цикла делится этими диагоналями на некоторое число областей. Если число диагоналей равно d , то таких областей будет $d + 1$.

— Почему, Холмс?

— Представьте себе, что мы добавляем диагонали по одной. Сам Гамильтоновский цикл ограничивает одну область, а каждая диагональ образует одну дополнительную область. Но есть и другой способ подсчета этих

областей. У каждой области есть определенное количество сторон — ребер окружающей сети. Предположим, что для каждого целого j , f_j — это число областей, имеющих j сторон. Тогда полное число областей внутри цикла вычисляется как сумма $f_2 + f_3 + \dots + f_n = d + 1$.

— Многие из этих величин f_j равны нулю, верно?

— Конечно. Далее я подсчитываю количество ребер, окружающих эти области, двумя способами. Любая область с j -сторонами ограничивается j -ребрами, поэтому такие области вносят в сумму дополнительный элемент $j f_j$.

— В таком случае, Холмс, сумма будет равна $2f_2 + 3f_3 + \dots + n f_n$.

— Ну не совсем. При таком подсчете каждая из d -диагоналей засчитывается дважды, по одному разу для каждой области, которую она ограничивает, но n ребер цикла считаются только по одному разу. Поэтому $2f_2 + 3f_3 + \dots + n f_n = 2d + n$. Теперь, удваивая первое выражение и вычитая его из второго, я получаю

$$f_3 + 2f_4 + 3f_5 + \dots + (n-2)f_n = n - 2.$$

Справедливо аналогичное уравнение и для внешних по отношению к циклу областей

$$g_3 + 2g_4 + 3g_5 + \dots + (n-2)g_n = n - 2,$$

где g — число областей за пределами цикла, имеющих j сторон. Наконец, вычитая одно уравнение из другого, я прихожу к цели, а именно к формуле Гринберга

$$(f_3 - g_3) + 2(f_4 - g_4) + 3(f_5 - g_5) + \dots + (n-2)(f_n - g_n) = 0.$$

— Весьма изящно, Холмс, и очень остроумно, но я не вижу, какое это имеет отношение к обвинению Даннета. Мы понятия не имеем, какими должны быть значения f_j и g_j . На самом деле если не существует Гамильтоновского цикла, то этих значений вовсе нет.

— Я надеюсь, что наше предположение о существовании цикла приведет к логическому противоречию. Далее, Ватсон, если вы внимательно проанализируете сеть для Гастлей-Грендж, то увидите, что каждая из ее областей имеет либо пять, либо восемь, либо девять сторон. Если существует цикл Гамильтона, то, согласно формуле Гринберга:

$$3(f_5 - g_5) + 6(f_8 - g_8) + 7(f_9 - g_9) = 0.$$

— Но есть только одна десятисторонняя область, все внешнее пространство сети, так что $f_9 - g_9$ равно либо 1, либо -1. Да, я думаю, что мы поймали негодя. Потому что теперь мы неизбежно приходим к заключению, что $3(f_5 - g_5) + 6(f_8 - g_8) = \pm 7$. Но найти решение этого уравнения невозможно, поскольку f_5, g_5, f_8 и g_8 являются целыми числами. Левая часть уравнения всегда дает значения, кратные трем, а правая часть может быть равна лишь 7 или -7.

— Следовательно, цикла Гамильтона не существует! Даннет лжет.

Холмс, я не могу выразить своего восхищения.

Он с улыбкой воспринял мой комплимент.

— Благодарю вас, Ватсон. Даннет должен был посещать хотя бы одну башню дважды. Он врал. Он наверняка возвращался в башню мисс Битрут. И действительно, есть по крайней мере один возможный маршрут, который проходит по всем башням, кроме башни мисс Битрут, по одному разу. Завтра мы предъявим Даннету обвинение в даче ложных показаний.

— Отлично, Холмс. Но что заставило вас подозревать именно его?

— Я послал тайную телеграмму в Скотланд-Ярд, чтобы проверили досье всех подозрительных, и выяснил, что зовут его Хью.

В недоумении я почесал затылок.

— И как же это вам помогло?

— Что же еще я мог подумать, получив телеграмму из Скотланд-Ярда, в которой было всего два слова: «Хью Даннет»?

(Игра слов. «Who done it» — читается как «ху дан ит» и переводится буквально «кто это сделал?» — традиционный вопрос всех детективных произведений: кто преступник? В статье автор использует и другие забавные созвучия, которым трудно найти адекватный перевод. — Прим. перев.)

Наука и общество

Гравитация проквантована?

ПОДОБНО кошкам и собакам, крупным отверстиям и квадратным штифтам, галстукам в горошек и форменным рубашкам, общая теория относительности и квантовая механика просто не сочетаются друг с другом достаточно хорошо. Общая теория относительности Эйнштейна описывает тяготение как деформации в структуре пространства-времени, тогда как квантовая механика рассматривает другие силы, управляющие материей, — электромагнитные, сильные и слабые ядерные силы — как взаимодействия энергетических пакетов, называемых квантами.

В своей области каждая теория работает хорошо: квантовая механика в основном обращается к микроскопическим эффектам, а общая теория относительности — к эффектам большего масштаба. Но уже давно физики

надеялись соединить эти два взгляда на окружающий нас мир с помощью единой теории всех физических явлений — от кварков до квазаров. В течение последнего десятилетия, безусловно, главная кандидатура для так называемой квантовой теории гравитации включала суперструны — бесконечно малые петли энергии, изгибы которых предположительно дают начало всем фундаментальным частицам и силам.

Однако за последние несколько лет теоретики, занимающиеся струнами, по-видимому, заблудились в запутанном, подобно лабиринту, математическом аспекте этой теории. Тем временем внимание стал привлекать другой, более «скромный» подход к квантовой теории гравитации. Новая теория имеет сходство с теорией струн, поскольку ее основополагающими элементами также являются миниатюрные петли. Однако эти петли описывают не объекты или события, а са-

мо пространство.

Модель назвали теорией петлевого пространства, или теорией Аштекара, — в честь А. Аштекара из Сиракузского университета, который сделал первый шаг навстречу этому представлению, пытаясь «подправить» уравнения общей теории относительности. (Аштекар не очень любил любое из этих названий, поскольку концепция петлевого пространства — всего только часть теории, а он является одним из нескольких ученых, содействовавших ее появлению. Он готов выслушать предложения относительно другого названия.) Так как теория была задумана семь лет назад, ей посвящено уже более 200 статей разных теоретиков. «Это самое замечательное из того, что случилось за последние годы, — говорит Дж. Уиллер из Принстонского университета, пионер в исследовании квантовой теории гравитации. — Необходимо еще многое понять, но это путь к достижению понимания».

Аштекар отмечает, что сформулировать гравитацию в терминах квантовой механики казалось когда-то довольно простой задачей. В общей теории относительности предсказывалось, что тяготение, подобно другим силам природы, распространяется в пространстве со скоростью света. Действительно, астрономы уже ищут сильные гравитационные волны, образованные парами «черных дыр» и другими необычными объектами (см. статью: Рассел Рутен. Улавливание волн, «В мире науки», 1992, № 5). Чтобы «проквантовать» гравитацию, физикам надо просто показать, что гравитационные волны действительно состоят из квантовых частиц — гравитонов, свойства которых похожи на свойства фотонов, глюонов и других элементарных частиц, переносящих взаимодействие.

Начиная с 60-х годов теоретики работали математический аппарат для выполнения этой задачи. Так называемые методы возмущений помогли устранить противоречия (подобные предположениям, вероятность которых превосходит 100%), когда физики пытаются получить точные предсказания из квантовых теорий электромагнетизма и ядерных сил. Методы возмущений позволяют избежать противоречий путем получения ряда приближенных, а не точных решений задачи.

Однако методы возмущений не позволяют устранить противоречия, обусловленные квантовыми моделями гравитации. Аштекар считает, что причина такой неудачи связана с существенным различием между тяготением и другими силами в природе.



СЛИШКОМ ЗАПУТАННАЯ теория? Ли Смолин из Сиракузского университета демонстрирует идею петлевого пространства с помощью модели, сделанной из колец для ключей. (Фотография: Frank Veronsky.)

Методы возмущений основаны на предположении, что кванты, передающие действие сил, переносятся, сталкиваются и «делают различные пируэты на неизменной сцене пространства-времени». Но, согласно общей теории относительности, гравитоны изменяют геометрию пространства-времени, и это в свою очередь влияет на поведение гравитонов. Это самосогласующееся, нелинейное свойство тяготения отличает его от всех других сил и делает невозможным попытки «укротить» его с помощью методов возмущений.

В середине 80-х годов Аштекар начал поиски «невозмущенной» квантовой теории гравитации, которая могла бы дать согласующиеся решения без использования приближений. Он решил, что ключом к решению задачи является замена метрики — переменной, представляющей геометрию пространства-времени в общей теории относительности, на некую более «податливую» переменную. В конце концов он выбрал математическую функцию, первоначально разработанную А. Сеном, физиком, в настоящее время работающим на фирме Motorola.

Переменная Сена расщепляет

пространство-время, которое в эйнштейновской метрике является единым четырехмерным континуумом, на две отдельные сущности, подверженные квантовой неопределенности и аналогичные координате и импульсу в традиционной квантовой механике. Измененные таким образом уравнения Эйнштейна неожиданно стали напоминать те, которые используются в квантовой теории электромагнетизма. Уравнения стали также значительно проще, и с ними стало легче оперировать.

Вскоре после того, как в 1985 г. Аштекар сообщил о своей работе, Т. Джекобсон из Мэрилендского университета, К. Ровелли из Питтсбургского университета и Л. Смолин из Сиракузского университета установили, что новая формулировка Аштекара действительно может давать точные решения для некоторых квантовых гравитационных состояний. Привлекая математическую теорию узлов, Ровелли и Смолин показали затем, что каждое из этих квантовых состояний может рассматриваться как отдельный узел, самой простой формой которого является петля. Эти петли похожи на силовые линии электрического поля.

Аштекар, Смолин и Ровелли попытались показать, каким образом узлы и петли могут быть переплетены друг с другом подобно звеньям в кольчуге, чтобы образовать структуру пространства, не имеющую «внешних» швов. Петли соединены так прочно, что их невозможно различить на расстоянии, превышающем 10^{-35} м, — расстоянии, настолько же малом по сравнению с атомом, насколько атом меньше Солнечной системы. В общей теории относительности предсказывается, что как раз при таком масштабе пространства, известном как планковский масштаб, гравитационные квантовые эффекты становятся существенными. Это также тот масштаб, при котором, как полагают, начинают оказывать влияние суперструны.

Одно из принципиальных различий между теорией петлевого пространства и теорией суперструн состоит в том, что последняя претендует на то, чтобы объяснить не только тяготение, но и все силы и элементарные частицы, существующие в природе. Такую теорию иногда называют «Теорией всего сущего». В настоящее время теория петлевого пространства менее совершенна, она описывает только распространение гравитонов через пустое пространство. Гравитоны образуют «узор», вплетенный в петли.

Аштекар и его коллеги только начали вводить элементарные частицы, отвечающие за другие силы и массу, такие, как фотоны или протоны, в модель петлевого пространства. Хотя модель правильно описывает взаимодействие тяготения и материи, Смолин допускает, что она, возможно, никогда не «объяснит» все силы в природе из первых принципов, подобно тому как предполагается в теории суперструн. «У нас нет каких-либо слишком далеко идущих честолюбивых замыслов, чтобы получить совершенную теорию природы, — говорит Смолин. — Наша идея заключается в создании квантовомеханической теории гравитации».

Это само по себе было бы огромным достижением. Тяготение — самая слабая из всех сил, и при большинстве условий его влияния на взаимодействия, происходящие на малых, квантовых масштабах, можно пренебречь. Однако квантовая теория гравитации принципиальна для понимания того, что произошло в первое мгновение Большого взрыва или около центра черной дыры, где величина энергии и плотности резко возрастает в направлении к бесконечности и преобладают эффекты планковского масштаба.

Некоторые физики предположили, что теория петлевого пространства основывается на ошибочных допущениях и не приведет ни к какому существенному достижению, которое можно было считать «прорывом» в этой области. «По моему мнению и мнению некоторых других теоретиков, занимающихся суперструнами, все это — просто заблуждение», — говорит Д. Гросс из Принстонского университета, известный сторонник теории суперструн. В конце концов, предсказывает он, теоретики, изучающие модель петлевого пространства, потерпят крах из-за тех же математических проблем, которые помещали в других попытках.

Эта оценка чересчур пессимистическая, считает Г. Горовиц из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Он предполагает, что некоторые сторонники суперструн слишком скептически настроены по отношению к теории петлевого пространства и любому другому подходу к квантовой теории гравитации, корни которого лежат в общей теории относительности, потому что они сформировались как физики в области элементарных частиц. «Хотя исследователи, разрабатывающие теорию петлевого пространства, не сумели доказать свою правоту, — говорит Горовиц, который относит себя к сторонникам теории суперструн, — я не думаю, что их проблемы непреодолимы. В конце концов, теория суперструн тоже еще окончательно не обоснована».

Смолин рассматривает суперструны и петли скорее как дополняющие, чем конкурирующие друг с другом подходы к более основополагающей физической теории. «Мы могли бы многому поучиться друг у друга, — говорит он. — Ни один из подходов, вероятно, не содержит истины. Люди будут узнавать все больше о том, каким образом решать отдельные части проблемы, и в конце концов появится совершенно новая теория, которая объединит обе эти идеи».

Последовательная теория квантовой гравитации, по мнению Смолина, вероятно, поможет разрешить некоторые «навязчивые» философские вопросы, которые квантовая механика поставила перед физикой в начале этого столетия. Присуща ли реальности неопределенность? Существует ли реальность независимо от наблюдения? «Я не думаю, что вы можете решить эти проблемы с позиций философии или просто обсуждая их, — говорит Смолин. — Для этого потребуются какая-то новая физика».

Джон Хорган

Дело времени

МОЖЕТ быть, это случайное совпадение, но как раз в то время, когда в конгрессе начались дебаты о сокращении финансирования крупных научных проектов, таких, как Сверхпроводящий суперколлайдер SSC и космическая станция «Freedom», внезапно появился мощный поток сообщений о последних открытиях, сделанных с помощью космического телескопа «Хаббл».

Самые последние из них продолжают восстанавливать доброе имя телескопа «Хаббл», которое было запятнано выявленными дефектами его зеркала. «Телескоп «Хаббл» — это замечательный, великолепный инструмент», — не устает повторять А. Сандейж из Обсерватории Карнеги, который участвовал в одном из самых многообещающих экспериментов, проводившихся с помощью этого телескопа: попытке определить скорость расщепления Вселенной.

В течение многих лет величина, называемая постоянной Хаббла, служила источником вдохновенных размышлений и жарких споров. Любопытно, что различные группы астрономов придерживаются двух сильно различающихся значений постоянной Хаббла, одно из которых вдвое превышает другое. Из большего значения следует, что возраст Вселенной составляет около 10 млрд. лет, из меньшего же — что ее возраст ближе к 20 млрд. лет. Сандейж уже давно считает, что постоянная Хаббла имеет меньшее из двух значений.

Теперь благодаря космическому телескопу в его распоряжении появился значительно более мощный инструмент, чтобы подкрепить свою точку зрения. В сотрудничестве с Г. Тамманом из Базельского университета в Швейцарии и тремя исследователями, работающими в Институте космического телескопа, Сандейж использовал телескоп «Хаббл» для исследования пульсирующих переменных звезд, называемых цефеидами, в слабосветящейся спиральной галактике, обозначаемой IC 4182, часто изучавшейся и служившей своего рода «верстовым столбом» в космосе. Наблюдения таких звезд представляют собой первый этап в определении космической шкалы расстояний и скорости расширения Вселенной.

Цефеиды в галактике IC 4182 недоступны наземным наблюдениям, а телескоп «Хаббл» позволил Сандейжу и его коллегам наблюдать в ней 27 таких звезд. Когда полученные результаты были проанализированы, было получено более низкое значение постоянной Хаббла — как раз то, кото-

рое отстаивал Сандейж. «Я уверен в результатах, полученных с помощью телескопа «Хаббл». Это первый результат из тех, которых они боялись», — говорит Сандейж, намекая на своих оппонентов, придерживающихся концепции более молодой, быстро расширяющейся Вселенной. Но даже он сомневается, что его последнее открытие разрешит спор.

Другие открытия, сделанные с помощью космического телескопа, имеют важное, хотя и менее спорное, значение для понимания того, как эволюционировала Вселенная. Р. Уиндхорст из Аризонского университета и У. Кил из Алабамского университета с несколькими сотрудниками обратили внимание на необычную галактику 53 W002. Наземные радионаблюдения дают основание предположить, что эта галактика может быть очень молодой. Она также довольно далека от Земли (на расстоянии около 10 млрд. св. лет, если в качестве «компромиссной» величины принять возраст Вселенной 15 млрд. лет).

В оптической области спектра галактики 53 W002 преобладает излучение чрезвычайно горячих, короткоживущих звезд. Такое большое число быстро эволюционирующих звезд означает, что возраст галактики всего около 50 млн. лет. С другой стороны, на очень четком изображении галактики 53 W002, полученном с помощью телескопа «Хаббл», обнаруживается, что распределение излучения в пределах галактики имеет близкое сходство с тем, которое наблюдается в современных, сильно проэволюционировавших эллиптических галактиках. Из космологических теорий следует, что протогалактике требуется около 500 млн. лет, чтобы сколлапсировать в такую структуру. В этом случае астрономы наблюдают галактику 53 W002 в уникальный период ее эволюции — во время перехода из «младенчества» во взрослое состояние.

Наблюдения Уиндхорста указывают на то, что, несмотря на молодой возраст, в галактике 53 W002 содержится очень мало межзвездного газа. Это означает, что процесс звездообразования был очень интенсивным. «Никто не понимает процесса звездообразования», — признается он.

Уиндхорст отмечает также, что галактика 53 W002 должна была образоваться миллиарды лет спустя после появления первых квазаров. Этим подтверждаются другие свидетельства того, что различные галактики эволюционируют с сильно различающимися скоростями. «Как и галактика 53 W002, большинство галактик начало коллапсировать, когда воз-

раст Вселенной уже насчитывал несколько миллиардов лет», — говорит он. Однако такая интерпретация неверна, если возраст Вселенной всего 10 млрд. лет, поскольку в этом случае галактикам остается слишком мало времени для того, чтобы в ходе эволюции они достигали современного уровня.

В ходе исследований, связанных с этой проблемой, Р. Гриффитс из Института космического телескопа изучает класс слабых, но широко распространенных галактик, которые расположены на расстоянии нескольких миллиардов световых лет от Земли. Слабые галактики наблюдаются по всем направлениям, поэтому Гриффитс использует метод, который в других условиях был бы напрасной тратой времени. Он делает моментальные снимки с большим полем зрения произвольных участков неба, когда какой-либо из приборов космического телескопа «Хаббл» наведен на определенный объект.

На первых двух снимках, сделанных таким методом, Гриффитс обнаружил около 2500 галактик. Он еще не классифицировал их, но отмечает, что видит «много неправильных галактик и множество взаимодействующих систем». Эти открытия указывают на то, что слабые объекты могут быть зарождающимися слабо связанными звездными системами, которые последовательно сливались, чтобы в конце концов образовать современные галактики типа нашего Млечного Пути.

Значительное время было затрачено на поиски с помощью космического телескопа «Хаббл» гигантских черных дыр, которые, как предполагают, находятся в центрах многих галактик. Изображения галактик M32 и M87 подтвердили данные, собранные другими астрономами при наземных наблюдениях. Но прекрасное изображение туманности M51 застало многих астрономов врасплох.

Х. Форд из Университета Джона Гопкинса сообщил об открытии своеобразной темной крестообразной структуры, простирающейся примерно на 100 световых лет через яркое ядро галактики. Он полагает, что одна перекладина креста соответствует видимому с ребра наклоненному тору из газа и пыли, который обращается вокруг массивной черной дыры, расположенной в ядре галактики M51. А другая перекладина может быть вторым кольцом, обращаемым вокруг черной дыры, или веществом, взаимодействующим с мощными выбросами из окрестности черной дыры. Форд предпочитает интерпретировать вторую перекладину креста как



В ядре соседней галактики. Водоворот скрывается черная дыра (Фотография: Holland Ford/NASA.)

«предупредительный знак, который показывает, что мы еще плохо понимаем, что происходит в центре галактики M51».

Некоторые из открытий, сделанных с помощью космического телескопа «Хаббл», затрагивают объекты, находящиеся гораздо ближе к Земле. Одно из последних открытий помогло пролить свет на механизм инициирующей солнечные вспышки — гигантские выбросы плазмы на Солнце. В течение многих лет ученые разрабатывали теории, согласно которым протоны, ускоренные в магнитном поле Солнца до высоких скоростей, могли бы играть важную роль в генерации солнечных вспышек. Когда эти протоны врезаются в более плотные нижележащие слои Солнца, их кинетическая энергия может породить солнечную вспышку. Протоны должны давать характерный всплеск ультрафиолетового излучения. Оно не может пройти через земную атмосферу, а запущавшиеся ранее космические аппараты не могли быть наведены на Солнце или детектировать такое кратковременное явление.

Благодаря большой светосиле космического телескопа «Хаббл» Б. Вудгейту из Центра управления космическими полетами им. Годдарда, которому помогали Р. Робинсон из Computer Science Corporation и три других сотрудника, удалось, наконец, обнаружить излучение, свидетельствующее о движении протонов вниз, к центру Солнца. Он навел космический телескоп не на Солнце (иначе бы оно сожгло его чувствительную оптиче-

скую систему), а на красный карлик — звезду AU Микроскопа на небе южного полушария. Механизм, вызывающий вспышки на звезде AU Микроскопа, предположительно тот же, что и действующий на Солнце.

Большой удачей оказалось то, что во время проводимых Вудгейтом наблюдений, на звезде произошла мощная вспышка. После скрупулезного анализа данных группа Вудгейта обнаружила «след» предсказываемой протонной вспышки продолжительностью 3 с. Вудгейт надеется скоординировать свои будущие наблюдения с других космических спутников. Совместная обработка результатов должна определить энергию протонов и снять покров тайственности еще с одного явления солнечной динамики, временами очень мощного.

Замечательные открытия, уже сделанные с помощью космического телескопа «Хаббл», свидетельствуют о горестях и радостях исследователей, работающих с телескопом. «Хаббл» обещает дать еще более удивительный открытия, особенно после полной коррекции его оптической системы в 1994 г. Если бы все шло по плану, то астрономы имели бы возможность изучать изображения уже сейчас. Но на деле им остается только молитвенно сложить руки и уповать на лучшее, так как космический телескоп «Хаббл» подвергается всяческим превратностям, связанным с графиком полетов космических аппаратов многоцелевого использования и финансированием космических исследований.

Эволюция, сложность и хаос

ЛЕО Басс нервничал, стоя рядом с проектором. Он должен был выступать следующим на научном семинаре в институте Санта-Фе, состоявшемся летом 1992 г. За круглым столом перед ним сидели лауреаты Нобелевской премии по физике М. Гел-Манн и Ф. Андерсон. Они листали газеты и чертили что-то в блокнотах. Примерно еще два десятка ученых — биологи, физики, экономисты, программисты и математики — пытались поудобнее устроиться на стульях с высокими жесткими спинками.

«Мне уже давно не нравится теория эволюции», — начал Басс, энергично прохаживаясь из стороны в сторону. — Основной упор в ней делается на частоты — частоты аллелей, особей, — продолжал биолог из Йельского университета. — Все это хорошо, когда у вас есть классы организмов и вам известны взаимоотношения между ними. Но это ничего не говорит о том, как возникли классы».

Недовольство ортодоксальными теориями и страстное желание расколоть гранит научных постулатов — вот, пожалуй, что объединяло участников семинара и подогрело дискуссии в институте Санта-Фе. На протяжении последних шести лет этот научно-исследовательский центр в штате Нью-Мексико был кипящим котлом, в котором переваривались «грандиозные вопросы»: как мир стал таким сложным? Почему в нем так много порядка и одновременно так много нестабильности? Почему прогресс обычно имеет место на границе, разделяющей порядок и хаос? Существуют ли общие закономерности в том, как системы — экономические, социальные, биологические или какие-то еще — приспособляются и изменяются?

Ответы, как полагают исследователи, бывающие на научных семинарах в институте, заключены в большом количестве закономерностей, возникающих вновь и вновь в таком широком разнообразии систем, как экономика Кремниевой долины, экология того или иного водоема или сложные алгоритмы, выполняемые на компьютере. Эти и другие изменяющиеся «миры» ученые описывают как «сложные адаптивные системы». Сплетая воедино понятия из многих научных дисциплин, эти ученые надеются глубже понять, как возникают и как развиваются сложные системы.

В каком-либо другом месте такая попытка, возможно, рассматривалась бы как ученый разговор на вечеринке. «Я привык заниматься наукой

по-другому, — признает Дж. Смит, специалист по эволюционной биологии из Университета графства Сассекс в Брайтоне (Англия). — Я никогда не шел от общего к частному». И все же эти летние семинары показались ему интересными, и, по его словам, он взял на вооружение пару новых подходов к изучению динамики систем. «Это очень изобретательные люди, — добавляет он, — я надеюсь, что они добьются успеха».

Несомненно, институт уже приобрел репутацию места, где происходят необычные встречи. Он стал прибежищем для тех, кто занимается «искусственной жизнью», для разного рода компьютерных романтиков. Искусственная жизнь моделирует простые живые организмы с помощью компьютерных алгоритмов, а иногда моторчиков и колесиков. Среди наиболее популярных работ, «хитов», на третьей такой конференции, состоявшейся прошлой весной, была искусственная экосистема под названием Тьерра, которую изобрел биолог Т. Рэй из Делаварского университета. Одноклеточные «организмы», создаваемые компьютерными программами, начинают размножаться на Тьерре, они достигают зрелости и вступают в конкуренцию друг с другом в борьбе за источники жизни. Возникают также и паразиты, за которыми следуют новые паразиты, вскармливаемые на старых видах. На своей модели Тьерра Рэй наблюдает, как развиваются сложные системы и как они приобретают новые свойства.

Несмотря на грандиозные цели, институт иногда довольствуется весьма небольшим бюджетом, в этом году он составил три миллиона долларов. Треть средств поступает из правительственных источников, другая треть выделяется различными фондами, а остальное — это инвестиции частных компаний и индивидуальных спонсоров. Хотя около 50 ученых, время от времени приезжающих в Санта-Фе, регулярно участвуют в семинарах и представляют свои работы, лишь небольшая группа исследователей проводит здесь более нескольких недель подряд.

В институте довольно умело проводится интеграция различных подходов, отчасти потому, что большинство исследователей достаточно уверено чувствуют себя в современных математических теориях и владеют компьютерным моделированием. «В междисциплинарных проектах обычно присутствует некоторый элемент дилетанства, — отмечает У. Брок, экономист из Висконсинского университета, регулярный участник семинаров в Санта-Фе. — В противополож-

ность этому институт заставляет нас объединять свои подходы, чтобы достичь незаурядных результатов». Э. Блох, в прошлом председатель Национального научного фонда, а теперь один из влиятельных членов Совета по конкурентоспособности в правительственной администрации, добавляет: «Умение сочетать многие дисциплины придает институту значительный вес. Это уникальный подход, которому трудно было бы следовать в других научных учреждениях».

Нелинейные системы были первой темой, которая собрала и объединила представителей различных научных направлений в Санта-Фе. Нелинейные системы — это такой объект, о котором трудно сказать что-либо как о целом на основании наблюдений за поведением его отдельных частей. Однако в основе даже кажущихся хаотичными процессов лежит небольшое число специфических (хотя и очень сложных) закономерностей (паттернов) поведения, называемых аттракторами. «Когда все это начиналось, институт Санта-Фе был единственной организацией, в которой ученые всерьез изучали хаос и поведение нелинейных систем, — говорит Блох. — Теперь это уже давно не так, но институт Санта-Фе в этом смысле был пионером».

В последнее время внимание сотрудников института сосредоточено на более запутанных вопросах, возникших в связи с изучением так называемых сложных адаптивных систем. Если нелинейные системы имеют небольшое число переменных и их поведение сводится к небольшому числу аттракторов, то «системы, которые нас интересуют, имеют бесконечное число аттракторов, или, другими словами, вариантов поведения, и бесчисленное число переменных», — поясняет Андерсон из Принстонского университета.

Более точное определение сложности — это особая проблема. Некоторые системы могут быть сложными, но они не адаптивны. П. Бэк, старший научный сотрудник Брукхейвенской национальной лаборатории, говорит о тенденции больших систем к такому состоянию, при котором статистически предсказуемые лавины изменений возникают как «самоорганизованная критичность». (Песчаные холмы являются прекрасной иллюстрацией этой идеи.) Другие красочно характеризуют критичность как «край, за которым хаос», граница между упорядоченностью и беспорядком.

Другие сложные системы состоят из агентов, которые постоянно адаптируются к меняющимся условиям. Просто устроенные, они тем не ме-

нее собирают информацию об окружающей среде, извлекая полезные данные на фоне случайного шума. Затем агенты сжимают информацию в модели, или схемы, которыми они пользуются, чтобы предвидеть и реагировать на изменения в среде. Со временем они модифицируют эти схемы так, чтобы они могли реагировать на новую информацию.

Но каким образом эволюционируют адаптивные агенты? Согласно сценарию, предложенному С. Кауфманом, биохимиком с медицинского факультета Пенсильванского университета, в модели коэволюции имеет место самоорганизованная критичность. Например, сообщества с докритичным или низким уровнем разнообразия организмов не способны быстро породить поколение потомков, обладающих новыми свойствами; с другой стороны, надкритичные сообщества разрастаются так быстро, что поглощают все имеющиеся ресурсы и вымирают. Однако на границе с хаосом, по его словам, возникают мутации и появляются новые свойства.

Басс и один из научных сотрудников института Санта-Фе У. Фонтана придерживаются другого мнения относительно того, как возникают новые классы организмов. Если вернуть время к началу отсчета, то какими должны были быть условия, чтобы возникли современные классы организмов, такие, как многоклеточные организмы? Какие другие условия возникли в ходе дальнейшего развития, которые обусловили появление конкретных ветвей эволюции — скажем, появление лягушки? Пытаясь смоделировать простейшие взаимодействия в сообществе с помощью компьютера, они надеются лучше понять, «не то, как выживает сильнейший, а как появляется сильнейший», — говорит Басс.

Интересно отметить, что один из наиболее очевидных примеров сложных адаптивных систем оказался самым трудным орешком для исследователей в Санта-Фе — это экономика. В настоящее время здесь разрабатываются модели процесса обучения биржевых игроков, а также изменения крупных городов. «Характер нашей деловой активности меняется, и динамика этих изменений недостаточно хорошо представлена в классической экономике», — говорит Х. Лиштейн, вице-президент Нью-Йоркской корпорации, которая ежегодно выделяет институту более 100 тыс. долл.

Ученые института считают, что они неплохо поработали в течение последних шести лет. «Я с удовлетворением замечаю, что у нас все более ус-



СООБЩЕСТВО ЦИФРОВЫХ ОРГАНИЗМОВ, созданное Томасом С. Рэем, начинается с одноклеточных «предков». Затем в нем развиваются паразиты. Смерть, символизируемая черепом, уничтожает старых и неполноценных. (Компьютерная графика: Anti-Gravity Workshop, фото: Чел Беесон.)

пешно осуществляется некий синтез», — говорит Джелл-Манн из Калифорнийского технологического института. «Мы не говорим, что существует наука о «сложности», — добавляет Д. Пайнз, физик из Иллинойского университета. — Но мы столкнулись с целым набором понятий, применимых к сложным адаптивным системам, которые выглядят весьма обещающими для широкого диапазона систем».

По мнению У. Артура, экономиста из Станфордского университета, «наука и заключается в создании понятий». До начала 80-х годов XVII в. «люди смотрели на мир и говорили, что он беспорядочный, живой и органический», — замечает он. — Спустя пятьдесят лет после открытия Ньютона, все что могли видеть вокруг себя люди — это был порядок, статика, равновесие и гармония». Сейчас таких удобных понятий уже недостаточно. Воодушевленные вычислительной мощью и понятиями, которыми можно характеризовать сложность, ученые хотят «пойти дальше порядка и строить системы на основе простых предпосылок, которые в действительности оказываются очень и очень

запутанными», — говорит Артур.

В течение следующих нескольких лет исследователи в Санта-Фе должны будут наполнить конкретным содержанием придуманные ими понятия, отыскав в природе больше свидетельств в пользу их правильности или построив более достоверные модели. Именно те качества, которые делают институт таким привлекательным, а именно его междисциплинарный подход, устремленность в будущее и способность привлечь ученых из многих научных организаций, говорят о том, что репутация института и его успех завоевываются не громкими именами.

Дж. Холланд, специалист по информатике из Мичиганского университета и один из ведущих специалистов института, считает, что избранный в институте стиль работы прочно укореняется. «Такое встретишь не часто, но это начинание имеет чрезвычайно важное значение», — говорит он. А. Дж. Кауэн, основатель института, добавляет: «Когда вопрос четко поставлен, можно надеяться, что ответ будет найден».

Элизабет Коркоран

Век Нильса Бора



ФИЛИП MORRISON

Эйбрахам Пейс. ВРЕМЕНА НИЛЬСА БОРА В ФИЗИКЕ, ФИЛОСОФИИ И ПОЛИТИКЕ

NEELS BOHR'S TIMES, IN PHYSICS, PHILOSOPHY, AND POLITY, by Abraham Pais. Oxford University Press (Clarendon Press), 1991 (\$ 35)

БОРУ и Эйнштейну было... за шестьдесят... когда я впервые встретился с ними, — пишет Эйбрахам Пейс. — Поскольку я один (и, возможно, последний) из тех, кто знал их хорошо лично... меня то и дело просят... сравнить их друг с другом». Примерно на четырех страницах своей книги Пейс сравнивает между собой этих двух людей, оставшихся друзьями почти в течение всей своей жизни — Бор был на 6 лет моложе и умер в 1962 г., семь лет спустя после смерти Эйнштейна.

В двух отношениях эти физики были «полными противоположностями». Для Бора «одним-единственным местом был дом — Дания. Эйнштейн... мог бы назвать себя цыганом или перелетной птицей» — он жил в девяти городах пяти стран. Другое основное и наиболее заметное различие состояло в том, что «для Эйнштейна была характерна обособленность, а для Бора — стремление к единению... Эйнштейн не был одинокой фигурой... Вместе с тем его глубочайшей потребностью было «думать отдельно»... Бор искал единения как в жизни, так и в мысли. Бор создал крупную школу, Эйнштейн — нет». Но между ними существовало и большое сходство. «Оба стремились к простоте, и в мыслях, и в поведении. Каждый из них на всю жизнь сохранил в себе мальчишескую — именно

мальчишескую, а не детскую — любознательность и испытывал особое удовольствие от игры как таковой. Они относились к науке очень серьезно, но для них она все же оставалась игрой».

Так пишет профессор Пейс (тоже известный физик-теоретик), полагаясь на свои воспоминания и достоверные источники. Им были опубликованы подробные биографии двух выдающихся ученых нынешнего столетия. Одна из них («Изошрен Господь...», посвященная Эйнштейну) вышла в свет в 1982 г., другая («Времена Нильса Бора в физике, философии и политике») — в 1991 г. Обратимся сейчас к последней из них и взглянем лишь на некоторые из многочисленных событий «века Бора».

Молодой Нильс поступил в Копенгагенский университет в 1903 г., где предметом его специализации была физика. Через год в тот же университет поступил его брат Харальд Бор, который был на полтора года младше Нильса. В университете они были неразлучны. «Я никогда не встречал людей более близких меж собой, чем они», — писал один из их товарищей. Они были наперсниками друг другу, их связывали свои игры, «размышления вдвоем», а также увлечение наукой, поэзией и футболом. Полузащитник Харальд Бор стал националь-



НИЛЬС БОР со своей женой Маргарет (на снимке слева). Снимок сделан в аэропорту Копенгагена в августе 1945 г. по их возвращении в Данию после 2-летнего отсутствия в связи с обстоятельствами, продиктованны-



ми войной. На снимке справа запечатлены Бор и Эйнштейн на одной из улиц Брюсселя в период проведения Сольвеевского конгресса в 1930 г. Оба ученых всю жизнь поддерживали друг с другом дружеские отношения.

ной фигурой в спорте. Более медлительный и более крепкий Нильс был вратарем, порой весьма невнимательным. Впоследствии Харальд завоевал международную известность, но уже в математике. Он умер, когда ему было 63 года. Нильс позже сказал о нем: «Он был во всех отношениях более умным, чем я... великим математиком». Отец мальчиков был профессором физиологии Копенгагенского университета (впоследствии он стал его ректором) и пользовался всеобщим уважением. Их мать, любящая и энергичная женщина, происходила из богатой еврейской семьи, глава которой был известным в Дании политическим деятелем. Семья Боров не была религиозной; мальчики, крещенные как лютеране, в зрелом возрасте отошли от церкви.

В 1911 г. Нильс, защитив докторскую диссертацию, отправился в Англию, в Кавендишскую лабораторию Дж. Дж. Томсона, где намеревался пройти стажировку. Его пребывание там было недолгим и принесло молодому ученику некоторое разочарование. Вскоре Бор переезжает в Манчестер, в лабораторию Эрнеста Резерфорда; там началась их дружба, которую они сохранили в течение всей своей жизни. Домой Нильс вернулся почти через год с потрясающей смелой идеей квантования электронных орбит вокруг «ядра Резерфорда». А уже в 1913 г. Бор публикует свою теорию атома, поначалу воспринятую многими как «триумф над логикой».

Через несколько лет Бор становится профессором Копенгагенского университета и вскоре организует (при поддержке правительства и общества) при университете Институт теоретической физики. Институт, носящий с 1965 г. имя его основателя, стал любимым домом для физиков-теоретиков, работающих над проблемами квантования механики. В его стенах были воспитаны десятки молодых физиков. Помимо неутомимого стремления «познавать совместно», Бор никогда не оказывался в стороне от практической помощи. В его институте работали ученые, чьи имена отмечены наиболее выдающимися открытиями в квантовой механике, среди них — Гейзенберг, Шредингер, Дирак, Паули, Крамерс, Клейн, Ландау, Гамов, Франк. В период жизни Бора Институт теоретической физики опубликовал свыше 1200 работ и в нем работали более 400 ученых из 35 стран.

Благодаря поддержке внутри страны и из-за рубежа (включая значительные поступления от американских фондов) Бору удалось превратить свой институт в центр подготов-

ки физиков-теоретиков, который к тому же стал «родным гнездом» для многих из них. В 1932 г. Бор с семьей переселяется в Карлсберг, в «Дом чести» — роскошный особняк, переданный ученому (как «самому почетному гражданину Дании») в пожизненное пользование. Вскоре он превратился в место встречи физиков, где в непринужденной обстановке, свободной от высокомерия и тщеславия, обсуждались самые серьезные научные проблемы. Эйнштейн писал: «Он (Бор) высказывает свое мнение, как бы продвигаясь ощупью, и совсем не похож на того, кто уверен, что располагает несомненной истиной».

Известен интерес Бора к философии, которой он интересовался гораздо больше, чем его прагматичные друзья. По сравнению с другими авторами его статьи обычно не столь насыщены математикой и техническими терминами, хотя это вовсе не означает, что они легки для чтения. Из его идей наибольшую известность в философии получил принцип неопределенности. Когда Бора наградили датским орденом Слона, он придумал герб, на котором изображен китайский символ единства противоположностей. Надпись на гербе гласит: «Противоположности суть дополнения». Поэт Уильям Блейк выразил эту мысль так: «Отрицания не существует, но противоположности существуют взаимно». Такими противоположностями являются, например, частица и волна.

В 30-х годах институт Бора в Копенгагене стал одним из ведущих центров ядерных исследований. Отто Фриш и Лизе Мейтнер, работавшие с Бором в 1938 г., дали теоретическое объяснение удивительным экспериментам, в которых происходило деление ядер урана под действием медленных нейтронов. Представление о неустойчивости равновесия между электрическими силами отталкивания, действующими между протонами, и силами, удерживающими нейтроны вблизи их протонных «партнеров», во многом обязано идее Бора (высказанной им в 1936 г.) о том, что все тяжелые ядра можно рассматривать как капельки заряженной квантовой жидкости. В свою очередь можно провести аналогию, хотя и весьма смелую, между этим подходом и работой, которую студент-старшекурсник Нильс Бор написал в 1906 г. В лаборатории своего отца он измерил фотографическим методом поверхностные вибрации, которые вынуждают тонкую струю воды распадаться на капли. За эту работу Датская академия наук присудила Бору золотую медаль. И это был первый и по-

следний эксперимент, когда-либо проведенный Бором.

В 1939 г. Бор отправился в давно запланированную поездку в США, намереваясь провести несколько месяцев в Принстоне. В феврале того же года он опубликовал работу, в которой убедительно показал, что неустойчивый уран может представлять собой довольно редкий изотоп этого элемента. Его ядро менее устойчиво и возбуждается в гораздо большей степени при захвате нейтронов. В сентябре 1939 г. Бор совместно с Джоном Уилером — американским физиком-теоретиком — публикует статью, в которой подробно рассмотрен механизм деления ядер. В начале 1940 г. эта теория получила экспериментальное подтверждение. С тех пор изотоп U-235 становится сверхмощным взрывчатым веществом, которое стремился заполучить враждебный мир.

В одну из ночей 1943 г. семья Бора была вынуждена бежать из Дании морем, поскольку оставаться в стране означало подвергать себя смертельной опасности. Они были среди 7000 датских евреев и беженцев, которых датчане тайно вывели в нейтральную Швецию всего за несколько дней до запланированных нацистами арестов этих людей и их депортации. Никакая другая оккупированная страна не провела столь успешную акцию по спасению своих граждан от лагерей третьего рейха.

Сторонник интернационализма, гражданин небольшой и традиционно нейтральной страны, Бор осознал, что и он причастен к высвобождению ядерной энергии. Деление ядер, хотя и открытое неожиданно, само по себе не представляло некоей суперпроблемы в физике. Однако в другой области — в политике — это открытие имело решающее значение. С появлением ядерного оружия, ставшего средством устрашения, над миром нависла смертельная угроза. Бора, естественно, глубоко волновала эта острейшая проблема. В 1950 г. он делает попытку, правда безуспешно, убедить американских государственных деятелей использовать энергию атома исключительно в мирных целях. В 1956 г. он обращается с таким же призывом в ООН в своих письмах. Эти призывы не привлекли к себе должного внимания мира, охваченного гонимой вооружения, и многим они казались утопичными, но вместе с тем они способствовали образованию трещин во льду холодной войны.

Следует отметить, что Бор был также «пионером гласности». В меморандуме, который он направил в 1948 г. Джорджу Маршаллу — амери-

канскому госсекретарю, содержится предложение принять «неотложные меры, обеспечивающие возможность открытого обсуждения проблем на взаимной основе» с тем, чтобы все могли открыто высказывать свое суждение относительно реально существующего положения дел. В то время никто не был готов к этому и

изменения наступили здесь лишь много лет спустя, с приходом Михаила Горбачева. Возможно, усилия Бора в этом направлении первоначально и оказали лишь незначительное влияние, однако именно он указал путь, который, судя по всему, выводит нас из дремучего леса.

Наука и общество

Рост населения угрожает

СЛЕДУЕТ ли предпринимать какие-либо меры в связи с ростом народонаселения, а если следует, то какие именно? Чуть ли не у каждого человека есть свои соображения по этому поводу. Наверное, поэтому так часто возникают противоречия между различными научными и общественными группами, занимающимися правами женщин, планированием и здоровьем семьи, охраной окружающей среды, а также такими проблемами, как снижение потребления природных ресурсов, экономическое развитие и регулирование численности населения. «В решении проблемы роста народонаселения мы давно топчемся на месте. За последние 20 лет ничего не изменилось, — сетует Джоли Джакобсен, старший исследователь из Worldwatch Institution. — Существует множество расхождений во взглядах между различными группами, которым на самом деле не следовало бы конфликтовать друг с другом».

Действительно, вопрос этот едва не оказался камнем преткновения даже для делегатов Конференции ООН по окружающей среде и развитию (UNCED), состоявшейся летом 1992 г. в Рио-де-Жанейро. На официальной встрече, проходившей в 50 км за городом, ораторы, среди которых были исполнительный директор Программы ООН по окружающей среде Муштафа Толба и премьер-министр Норвегии Гру Харлем Брундтланд, призвали безотлагательно заняться проблемой роста народонаселения. «Такие вопросы, как борьба с бедностью, охрана окружающей среды и регулирование роста народонаселения, не могут больше решаться — и даже рассматриваться — по отдельности», — предупредил Брундтланд.

Одновременно в пригороде Рио участники Глобального форума, задуманного в качестве «параллельной» UNCED встречи, представители бо-

лее 1000 неправительственных организаций, критиковали попытки регулировать рост народонаселения как нарушающие права женщин, как способ уклониться от борьбы с низким уровнем жизни в развивающихся странах и как средство заткнуть рот населению «третьего мира». «Это похоже на селекцию — ликвидацию слабых элементов», — сказал Вандана Шива, директор Исследовательского фонда по науке, технике и политике в области природных ресурсов в Дерадан (Индия). «Фашизм не уходит в тень надолго», — добавил он.

Такие агрессивные выступления нельзя назвать новыми. Начиная с 1968 г., когда биолог из Станфордского университета Пауль Эрлих подчеркнул связь между ростом народонаселения и деградацией окружающей среды, специалисты сравнивают достоинство «контроля» за рождаемостью и экономическое развитие, имея в виду естественные средства замедлить рост населения. За это время численность населения на земном шаре увеличилась с 3,5 до 5,5 млрд. человек.

Хотя за последние 25 лет темпы прироста численности населения упали с 2% до 1,7%, в ближайшие 10 лет население Земли будет увеличиваться примерно на 97 млн. человек в год. К 2050 г. численность населения земного шара составит по прогнозам — в зависимости от темпов реального прироста — от 10 до 12,5 млрд. человек. При этом 97% итогового прироста придется, как предполагают, на развивающиеся страны, где в настоящее время 32% населения имеют возраст менее 15 лет, т. е. входят в тот период жизни, когда они могут завести детей.

В первый раз за все время такие организации, как Национальная академия наук США и Лондонское королевское общество, стали недвусмысленно говорить о необходимости сконцентрировать внимание на проблеме увеличивающегося человечества. Еще

до начала саммита в Рио-де-Жанейро эти организации выпустили совместное обращение, в котором содержится предостережение о последствиях перенаселения. «Контроль за ростом народонаселения является важнейшим фактором наряду с контролем за ущербом, причиняемым окружающей среде, — отмечает нобелевский лауреат Генри Кендалл, который осенью этого года должен приступить к проекту, касающемуся обсуждаемой проблемы. — Люди, возражающие против идеи регулирования численности населения, не понимают, что, если мы не сделаем этого мягко, природа распорядится в самой жесткой манере».

Однако до сих пор многие активисты движения за сохранение окружающей среды избегают касаться этой проблемы. Некоторые из них опасались, что потеряют часть своих сторонников, если поддержат политику, которая хотя бы косвенно связана с проблемой абортов. Например, в конце 60-х годов Джордж Буш однолично выступал за планирование семьи, а в 1984 г., будучи уже президентом, прекратил финансирование Фонда по народонаселению ООН. Он также перестал давать деньги на международные исследовательские группы, занимающиеся вопросами планирования семьи, которые оказывали консультации или услуги, касающиеся абортов (даже если американские деньги не тратились непосредственно на что-либо, связанное с абортами). «Всякий раз, когда вы говорите о планировании семьи или средствах предупреждения беременности, вы напоминаете об абортах», — говорит Эрик Уошберн из Совета по охране природных ресурсов, который начинает включать в свои программы вопросы, касающиеся проблемы роста народонаселения.

Эти группы не желают также бороться за проблемы иммиграции. А некоторые первоначальные попытки в этой области были подвергнуты критике. В Калифорнии, например, Сьерра-Клуб вместе с некоммерческой организацией под названием Балланс окружающей среды и народонаселения (со штаб-квартирой в Вашингтоне, округ Колумбия) предложил, чтобы иммиграционная политика США определялась на основе концепции «уровня замещения»: каждый год должен быть разрешен въезд 200 000 человек, что примерно соответствует числу эмигрирующих из США. Гражданские группы и активисты движения за права человека обрушились на этот план, назвав его расистским и империалистическим.

После Рио, однако, активисты,

обеспокоенные состоянием окружающей среды, похоже, начали осознавать, что игнорировать проблему народонаселения больше нельзя. «Люди приходят к пониманию того, что она является частью проблемы сохранения земной экосистемы», — говорит Дебора Мур, старший исследователь из Фонда защиты окружающей среды (EDF).

Иногда делают упор на сокращении потребления. Как отмечает EDF, промышленно развитые страны потребляют 75% производимой в мире энергии, хотя в них проживает лишь 25% населения земного шара. Другие ставят в центр проблемы такие факторы, как иммиграция, емкость территории (количество людей, которых может «содержать» данный регион без ущерба для окружающей среды) или лоббистская деятельность для «выбивания» денег на программы планирования семьи.

Финансовые инъекции оживляют некоторые программы по проблеме народонаселения. Несколько фондов выделили гранты для таких программ, осуществляемых исследовательскими группами. Так, например, фонд Pew Charitable Trusts обратился к 10 самым крупным американским ассоциациям, занимающимся проблемами окружающей среды (включая Ducks Unlimited), а также к религиозным организациям и группам, занятым проблемами народонаселения, и предложил им выдвигать свои программы. Pew Charitable Trusts готов выделить 10 грантов на общую сумму 400 000 долл. «Тут уж придется спешить», — замечает Мур.

Однако Мур и другие обеспокоены тем, что излишняя суетливость может привести к упрощению проблемы. «Мы плохо понимаем даже причины и эффекты изучаемых явлений», — говорит она. Высокая плотность населения не обязательно означает деградацию природной среды, утверждает Мур. Сведение лесов в бассейне Амазонки связано не столько с ростом населения, сколько с потребностями в расширении площадей под сельское хозяйство и заинтересованностью торговых партнеров Бразилии в экспорте из нее древесины и мяса. В противоположность этому загрязнение воды в таких городах, как Сан-Пауло, может быть непосредственно связано с перенаселенностью.

Кроме того, специалисты по проблемам окружающей среды, ученые и представители групп, занятых планированием семьи, обеспокоены тем, что некоторые мероприятия по контролю рождаемости игнорируют права человека и экономическое развитие. Принудительная стерилизация

(в таких странах, как Китай и Индия), неадекватные медицинские услуги и практика использования местного населения в качестве подопытных кроликов для испытаний противозачаточных средств дали отрицательный результат: многие женщины в странах «третьего мира» совершенно перестали доверять службам планирования семьи. «В прошлом правительства не церемонились с правами женщин», — отмечает Алекс Маршалл из Фонда народонаселения ООН.

Во многих программах не уделяется внимания здоровью семьи, отмечает Джакобсон из Worldwatch Institution. Она указывает, что в Тайланде, например, на фоне снижения темпов рождаемости растет распространенность венерических заболеваний. В Бразилии 41% женщин, прибегающих к средствам контроля рождаемости, были стерилизованы, просто потому что другие средства предупреждения беременности здесь гораздо менее доступны. «Будущее программ планирования семьи останется под вопросом, пока они не будут поставлены с головы на ноги», — считает Элен Старберд из Агентства международного развития США.

Старберд и другие высказывают мнение, что проекты по планированию семьи должны учитывать интересы людей, которые прибегают к таким услугам или отказываются от них, — интересы, о которых говорили женщины на встрече в рамках Глобального форума. «Мне бы хотелось, чтобы некоторые организации с Севера были более внимательны к женщинам в странах «третьего мира», — говорит Джон Роули из Международной федерации планируемой семьи.

Несмотря на неприемлемость ряда методов, применяемых при осуществлении мероприятий по контролю рождаемости, усилия в этом направлении находят поддержку среди активистов борьбы за женские права в «третьем мире». Они признают, что такие мероприятия часто ведут к улучшению экономического положения и здоровья женщин, в особенности если они подкреплены деятельностью в области здравоохранения и образования. «Предупреждение беременности — один из инструментов экономического развития», — отмечает Ванга Дж. Мумба, исполнительный директор Центра по окружающей среде и народонаселению в Лусаке (Замбия).

Однако, как показывают оценки экспертов ООН, несмотря на это 300 млн. женщин все еще лишены возможности прибегнуть к контролю

рождаемости, хотя 150 млн. из них хотели бы перестать рожать совсем или временно. Если бы их желания были удовлетворены, то к середине следующего столетия численность населения на земном шаре не превысила бы 9 млрд. человек. По мнению представителей ООН, для того чтобы достичь этой цели, средства, выделяемые на программы планирования семьи, должны быть удвоены к 2000 г. с 4,5 до 10,5 млрд. долл.

Горячие обсуждения на «мировом саммите» могут привести к некоторым шагам в нужном направлении. Первоначально вопрос народонаселения не был включен в повестку дня UNCED: делегаты от развивающихся стран заявили, что не будут обсуждать проблему народонаселения, если промышленно развитые страны откажутся обсуждать проблему потребления.

Но в один из подписанных на конференции документов, а именно в породивший множество споров раздел по «демографической динамике и устойчивости», попала тем не менее цифра 7,1 млрд. долл. Критики утверждают, что в 800-страничном плане по стратегии в области охраны окружающей среды и развития, получившем название «Agenda 21», проблема роста народонаселения отражена недостаточно четко. Они считают, что давление Ватикана и некоторых феминистских организаций привело к выхолащиванию формулировок, из которых исчезли выражения «предупреждение беременности» и «планирование семьи».

Другие считают, что основные идеи были сохранены. «Мы искали общий язык, из которого бы не исчезло существо проблемы, и мы нашли его», — поясняет Мэри Коулман из Университета шт. Пенсильвания, которая возглавляла группу, готовившую этот раздел. «Впервые мы нашли язык, который объединяет столь несхожие стороны, как мусульманские страны и Ватикан».

Но план «Agenda 21» мало что значит, пока не найдены деньги, пока не учитываются интересы женщин и пока не приступили к сотрудничеству различные организации. «Ситуация — глупее не придумаешь», — отмечает Уошберн из Национального совета охраны природных ресурсов. — Если какие-то группы и должны работать сообща, так это специалисты по проблемам окружающей среды, исследователи в области народонаселения и активисты движения за права женщин».

Маргерит Холлоуэй

Эссе

Времени терять нельзя



ЛОУРЕНС САММЕС

ВПОЛНЕ вероятно, что в экономике развивающихся стран большую прибыль могут принести капиталовложения в сферу школьного женского образования. Возможно, для экономистов эта область помещения капитала является необычной, однако следует иметь в виду, что вклад женщин в развитие той или иной страны с экономической точки зрения не менее значим, чем с социальной. И если в экономике все построено на стремлении получить выгоду, то нетрудно понять, почему так много молодых женщин лишены возможности получить образование.

В тех странах, где доход на душу населения очень низкий, родители не спешат вкладывать средства в образование своих дочерей, поскольку не надеются, что в будущем они улучшат материальное положение семьи; поэтому девочек готовят только к тому, чтобы выдать замуж в другие семьи и чтобы они рожали детей. Девочки, таким образом, ценятся меньше, чем мальчики, и их с ранних лет приучают к работам по дому, а мальчиков отдают учиться в школу. Нетрудно понять, что при таких условиях женщина попадает в порочный круг социального унижения.

С другой стороны, образованная мать имеет больше возможности увеличить доход семьи, если она работает вне дома и у нее появляется более широкий выбор приложения своего труда. Она, как правило, предпочитает иметь меньшее количество детей и чтобы они были более здоровыми и, кроме того, она может настаивать на их образовании, будучи уверенной, что ее дочерям должен быть предоставлен равный шанс. Если дочерям дают образование, то повышается вероятность того, что в следующем поколении девочки, равно как и мальчики, будут образованными и физически здоровыми. Порочный круг, таким образом, превращается в добродетельный.

Вряд ли кто будет оспаривать тот факт, что образование женщин приносит социальные выгоды. Нельзя не сказать и об экономических выгодах. Наиболее очевидно это проявляется в

прямой связи между образованием и заработной платой работающих женщин. Каждый дополнительный год в школьном образовании обеспечивает повышение заработной платы на 10—20%. Эффективность затрат, измеряемая такой величиной, значительно больше по сравнению с эффективностью других доступных способов вложения средств. Но это не все. Образованные женщины оказывают заметное влияние на улучшение здоровья членов своих семей и на планирование численности детей в семье.

Обратимся к некоторым цифрам, характерным для одной страны, чтобы проиллюстрировать, какая экономия достигается за счет улучшения показателей физического здоровья населения и планирования рождаемости. В Пакистане повышение на один год школьного образования дополнительно 1000 девочек в 1990 г. обошлось бы примерно в 40 тыс. долл. Каждый год обучения в школе, по некоторым оценкам, снижает смертность детей в возрасте от 5 лет на 10%. Учитывая, что средняя женщина в Пакистане имеет 6,6 детей, повышение школьного образования на один год у 1000 женщин смогло бы предотвратить смерть примерно 60 детей. Если за спасение жизней этого количества детей бороться средствами медицины, то это обошлось бы в 48 тыс. долл.

Образованные женщины также предпочитают иметь меньше детей. Экономические исследования показывают, что каждый дополнительный год в школьном образовании примерно на 10% снижает рождаемость у одной женщины. Так, затраты в размере 40 тыс. долл. на образование 1000 женщин в Пакистане привели бы к тому, что на свет не появилось бы 660 новорожденных. Затраты на предотвращение рождения одного ребенка с помощью мер контроля за рождаемостью, как показывают расчеты, составляют 65 долл., или 43 тыс. долл. на 660 детей.

Нетрудно подсчитать, что помимо приведенных данных относительно экономии повышение образовательного уровня 1000 женщин на один

школьный класс позволило бы предотвратить смерть 4 женщин при родах. Достижение такого же результата средствами медицины обошлось бы в сумму около 10 тыс. долл.

Все эти оценки, конечно, весьма приближенные. С одной стороны, мне не удалось определить, на сколько приведенные данные были бы меньше, если учесть, что результат повышения образовательного уровня женщин сказывается не сразу, а спустя несколько лет. С другой стороны, я не учитывал дополнительные выгоды, получаемые за счет того, что у физических более здоровых и более образованных матерей здоровее и образованнее не только дети, но и внуки. (Если учесть, что в Пакистане каждая имеющая детей женщина является бабушкой в среднем почти 40 внуков, то этот факт нельзя считать незначительным.)

Даже при соблюдении столь осторожного подхода в расчетах социальные выгоды, получаемые благодаря повышению численности образованных женщин, более чем достаточны, чтобы покрыть связанные с этим расходы. Учитывая, что образование также обеспечивает более высокие заработки, можно заключить, что эффект от увеличения численности девочек в школах превышает 20%, а возможно, и больше. Так что эта область, пожалуй, является одной из самых выгодных для размещения инвестиций в развивающихся странах.

Что же следует делать для того, чтобы средств в женское образование вкладывалось больше? Необходимо создать поощрительные образовательные фонды и увеличить количество бесплатно выдаваемых девочкам книг и различных учебных пособий. Важно также, чтобы система школьного образования учитывала культурные традиции и была удобной практически: число поступающих в школу девочек в сильной степени зависит от того, находится ли школа по соседству с домом, имеются ли в ней элементарные бытовые удобства — водопровод и канализация, а также от того, являются ли педагогами женщины или мужчины. Содействующими факторами следует считать и гибкий график посещаемости школы, и проявление заботы о младших сестрах и братьях школьников.

Увеличение численности обучающихся в начальных школах девочек до численности мальчиков в странах с низким подушным доходом означает, что ежегодно в школу нужно принимать дополнительно 25 млн. девочек, и на это потребуется 938 млн. долл. Достижение равного количества обучающихся мальчиков и девочек в средней школе означает дополнительный

прием в школы 21 млн. девочек, затраты на образование которых составят 1,4 млрд. долл. Эта сумма составляет меньше четверти процента суммарного внутреннего валового продукта этих стран, менее 1% суммы их капитальных вложений в новые средства производства и менее 10% их затрат на оборону.

Если эти затраты сравнить с капитальными вложениями, не связанными с общественным сектором, образование выглядит еще более привлекательной сферой вложения капитала. Возьмем, например, энергетику. Прогнозы говорят о том, что в течение следующих 10 лет развивающиеся страны израсходуют около одного триллиона долларов на строительство электростанций. В связи с плохим материально-техническим обеспечением и нехваткой денег на эти цели многие развивающиеся страны используют энергетические мощности имеющихся электростанций менее чем на 50% их потенциальной возможности. В 57 исследованных развивающихся странах суммарная прибыль с капитальных затрат на развитие основных фондов электростанций за последние 3 года в среднем составляла менее 4% и менее 6% за последнее десятилетие, т. е. она столь мала, что ее нельзя даже сравнить с прибылью, получаемой за счет вложения средств в женское образование и составляющей, как уже указывалось, 20% и более.

Безусловно, развивающиеся страны повысят производительность энергетических отраслей. И я, вероятно, несколько недооцениваю трудности, связанные с увеличением численности учащихся, не учитывая капитальных затрат и не производя тщательных расчетов тех расходов, которые вынуждены будут нести семьи учащихся в школах девочек. Тем не менее трудно согласиться с тем, что строительство 19 электростанций вместо 20 запланированных и использование сэкономленных средств на создание условий, при которых возможности мальчиков и девочек в получении школьного образования уравнились бы, является нежелательной мерой.

Некоторые утверждают, что образование девочек — это стратегия, которая окупится не скоро. Этот аргумент напоминает мне историю, которую любил рассказывать Джим Кеннеди: хозяин спрашивает своего садовника, сколько времени потребуется на то, чтобы из этого семечка выросло дерево. Садовник отвечает — 100 лет. На что хозяин сказал: «Тогда посади его сегодня же утром. Нельзя терять времени».

Почему бизнес нуждается в ученых



МАЙКЛ ШУЛХОФ

ДВАДЦАТЬ лет назад я был физиком и занимался экспериментами по рассеянию нейтронов в Брукхейвенской национальной лаборатории. Теперь, будучи вице-президентом компании Sony USA и президентом Sony Software, я представляю компанию Sony и в области электроники, и в бизнесе развлечений. Все мое время уходит на обсуждение различных проектов и на наблюдение за ходом их выполнения — от новых разработок в области телевидения высокой четкости до жанров популярной музыки.

На основании собственного опыта могу сказать, что чисто научное образование — это идеальная база для того, чтобы заниматься бизнесом. Скажу даже больше: американский бизнес во многом преуспел бы, если бы в нем было больше ученых и меньше магистров в области управления, руководящих корпорациями.

Почему я считаю, что работа с нейтронными детекторами оказалась хорошей школой для моей последующей работы в Sony? Будучи физиком, я выполнял работу, которую считал важной, и трудился с людьми, которыми я восхищался. Но работая в лаборатории, я задавал себе вопрос: занимаюсь ли я тем, чем хотел бы заниматься еще 20 лет? Я думал, может мне попробовать заняться бизнесом, но не был до конца уверен в том, что мне это нужно. Когда я поделился своими соображениями с моим консультантом по диссертации, выдающимся ученым Робертом Нейтансом, он дал мне добрый совет, который я никогда не забуду: «Не волнуйся, Микки. Ты — физик. Физики никогда не занимаются тем, чем не хотели бы заниматься. Если ты займешься бизнесом и увидишь, что тебе это не по душе, ты сам откажешься».

Очевидно, бизнес мне понравился, и я остался в нем. Но остался как физик. Не важно, в чем заключается моя работа, я все равно остаюсь ученым. И к решению проблем бизнеса я подхожу так же, как в свое время подходил к научным проблемам. Уроки, которые я усвоил на научном поприще, оказались исключительно полезными для моей работы в сфере бизнеса.

Некоторые из этих уроков являются столь же важными, какими явля-

ются строгие нравственные принципы в любой работе. Выпускники школ бизнеса 1980-х годов с удовлетворением практиковали долгие засиживания на работе. Но такой режим работы был широко распространен в научных лабораториях еще задолго до того, как Майкл Милкен стал широко известным. Я хорошо помню, как мне приходилось засиживаться до 3 часов утра около нашего уникального реактора, пока шел эксперимент. И мы с этим не считались. Только результат имел для нас значение. Когда перед вами стоит серьезная задача, личное время для вас уже не столь важно. Этот урок я хорошо усвоил и с этим пришел в новую для меня сферу.

Наука также развила во мне такое качество, как любознательность. Конечно, мне это было свойственно и раньше. Именно благодаря любознательности у меня и появился в свое время интерес к физике. Но работа в Брукхейвенской лаборатории научила меня, как стимулировать любознательность, сделать ее главным профессиональным качеством. Потом мои обязанности изменились. Однако любознательность во многом способствует все более глубокому моему погружению в сферу бизнеса. В науке любознательность воспринимается как должное. Хотелось бы, чтобы и в бизнесе это качество было более распространенным.

Хотелось бы также, чтобы те, кто занимается бизнесом, развивали у себя такую же настойчивость и целеустремленность, какие свойственны большинству ученых. Бизнесмены склонны проявлять нетерпеливость. Ученые, с которыми мне довелось работать, тоже с нетерпением ждали результатов. Но они понимали, что прежде чем настилать крышу, нужно заложить фундамент. Например, они учили меня, что прежде чем привнести что-нибудь значительное в ту или иную область, нужно сначала хорошо овладеть ее основами. Вскоре, после того как Sony приобрела киностудию Columbia Pictures, я начал читать сценарии тех фильмов, которые были уже на стадии съемки. Они не внушали мне больших симпатий к некоторым из постановщиков. Один из них вызывающе спросил меня, зачем мне нужны киносценарии. Он заявил,

что они не собираются мириться с тем, чтобы я вмешивался в творческий процесс. Но я ответил ему, что в данном случае он ошибается. Тем, кто занимался творчеством, я не хотел указывать, как нужно ставить фильмы, но я очень хотел постичь сам процесс производства фильмов.

Во многих школах бизнеса не уделяют особого внимания тому, чтобы бизнесмены стремились узнать как можно больше и как можно подробнее о том, чем они занимаются. Они ошибочно видят свою задачу в подготовке управляющего «по общим вопросам» — превосходного профессионала, способного взяться за любое дело и вести его.

Миф о том, что можно подготовить универсального администратора, породило целое поколение «перелетных» управляющих в американском бизнесе. Почти у всех них нет ни времени, ни желания постигать что-либо досконально в той области, в которой они работают. Чем бы они ни занимались, они ко всему подходят с позиции теоретических знаний, приобретенных в школе бизнеса. И часто они даже не утруждают себя размышлением над тем, насколько верны и полезны эти знания. В этом-то и заключается большое различие между выпускниками школ бизнеса и теми, кого готовили в ученые. Те, кто имеет образование в области бизнеса, к научным теориям относятся как к словоблудию. Для тех, кто имеет научное образование, теория — это отправная точка для постановки эксперимента.

Не менее опасная тенденция сложилась в высших школах бизнеса, которые не стимулируют творческий подход у выпускников. И чем выше репутация учебного заведения, готовящего бизнесменов, тем вероятнее, что его выпускники в своей практической работе будут скорее руководствоваться теорией управления, чем проявят собственное творческое мышление. Сейчас настало время, когда решения в сфере бизнеса должны приниматься на основе теорий управления, разработанных Уортоном или Гарвардским университетом. Но это и время, когда многое нужно делать по-своему.

Чтобы по-настоящему преуспеть в бизнесе, необходимо быть творческим предпринимателем, не боящимся рисковать. Я израсходовал 7 млрд. долл. из денег, принадлежащих Sony, чтобы приобрести такие компании, как Columbia Pictures и CBS Records. Это была стратегическая операция, рассчитанная на дальнейшее процветание Sony. Вы должны по-своему представлять будущее своей фирмы,

и у вас должна быть уверенность, что это будущее заслуживает того, чтобы для его достижения были вложены деньги. Эта задача мало чем отличается от вопроса о целесообразности финансирования того или иного научного исследования. Люди, которыми я более всего восторгался в науке, обладала таким творческим мышлением, что могли многое видеть наперед, и твердо верили в свою идею до тех пор, пока результаты исследования не убеждали их в ошибочности взглядов.

В ближайшие годы бизнесмены встанут перед необходимостью решать сложные проблемы с большой степенью риска не только для их собственной корпорации, но и для всего общества. Некоторые из этих проблем будут связаны с принятием решений относительно внедрения той или иной технологии, охраны окружаю-

щей среды, экономики и рынка и даже относительно правительства. У ученых это называется критическим мышлением. Они знают, что для того чтобы получить стоящие результаты, необходимо как следует потрудиться. Они не стесняются признать, что есть вещи, которых они не знают, и не жалуют времени на то, чтобы уяснить то, чего они не знают.

Бизнес требует такого же умения смотреть вперед и таких же интеллектуальных усилий. Он мог бы обрести способных к этому людей, если бы часть магистров в области управления была направлена в учебные заведения, готовящие докторов философии по различным направлениям в науке. Было бы замечательно, но вряд ли это возможно. Поэтому я думаю, что в бизнесе нужно привлечь больше ученых.

Библиография

РАЗВИВАЮЩИЙСЯ МОЗГ

PRENATAL DEVELOPMENT OF THE VISUAL SYSTEM IN THE RHESUS MONKEY. P. Rakic in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series B. Vol. 278, No. 961, pages 245-260; April 26, 1977.

OCULAR DOMINANCE COLUMN DEVELOPMENT: ANALYSIS AND SIMULATION. Kenneth D. Miller, Joseph B. Keller and Michael P. Stryker in *Science*, Vol. 245, pages 605-615; August 11, 1989.

COMPETITIVE INTERACTIONS BETWEEN RETINAL GANGLION CELLS DURING PRENATAL DEVELOPMENT. Carla J. Shatz in *Journal of Neurobiology*, Vol. 21, No. 1, pages 197-211; January 1990.

IMPULSE ACTIVITY AND THE PATTERNING OF CONNECTIONS DURING CNS DEVELOPMENT. C. J. Shatz in *Neuron*, Vol. 5, No. 6, pages 745-756; December 1990.

DEVELOPMENT. Edited by Corey S. Goodman and Thomas M. Jessell. Special issue of *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 2, No. 1; February 1992.

ЗРИТЕЛЬНЫЕ ОБРАЗЫ В СОЗНАНИИ И В МОЗГЕ

FUNCTIONAL SPECIALISATION IN THE VISUAL CORTEX OF THE RHESUS MONKEY. S. M. Zeki in *Nature*, Vol. 274, No. 5670, pages 423-428; August 3, 1978.

BLINDSIGHT: A CASE STUDY AND IMPLICATIONS. L. Weiskrantz. Oxford University Press (Clarendon Press), 1986.

SEGREGATION OF FORM, COLOR, MOVEMENT, AND DEPTH: ANATOMY, PHYSIOLOGY, AND PERCEPTION. Margaret Livingstone and David Hubel in *Science*, Vol. 240, pages 740-749; May 6, 1988.

THE FUNCTIONAL LOGIC OF CORTICAL CONNECTIONS. S. Zeki and S. Shipp in *Nature*, Vol. 335, No. 6188, pages 311-317; September 22, 1988.

THE REMEMBERED PRESENT: A BIOLOGICAL THEORY OF CONSCIOUSNESS. Gerald M. Edelman. Basic Books, 1990.

A VISION OF THE BRAIN. S. Zeki. Blackwell Scientific Publications (in press).

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБУЧЕНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНОСТИ

AMNESIA FOLLOWING OPERATION ON THE TEMPORAL LOBES. Brenda Milner in *Amnesia: Clinical, Psychological and Medicolegal Aspects*. Edited by C. W. Whitty and O. L. Zangwill. Butterworths, 1966.

A CELLULAR MECHANISM OF CLASSICAL CONDITIONING IN APLYSIA: ACTIVITY DEPENDENT AMPLIFICATION OF PRESYNAPTIC FACILITATION. R. D. Hawkins, T. W. Abrams, T. J. Carew

and E. R. Kandel in *Science*, Vol. 219, pages 400-405; January 28, 1983.

THE CURRENT EXCITEMENT IN LONG-TERM POTENTIATION. R. A. Nicoll, J. A. Kauer and R. C. Malenka in *Neuron*, Vol. 1, No. 2, pages 97-103; April 1988.

MEMORY AND THE HIPPOCAMPUS: A SYNTHESIS FROM FINDINGS WITH RATS, MONKEYS, AND HUMANS. Larry R. Squire in *Psychological Review*, Vol. 99, No. 2, pages 195-231; April 1992.

МОЗГ И РЕЧЬ

THE SIGNS OF LANGUAGE. Edward S. Klima and Ursula Bellugi. Harvard University Press, 1979.

KNOWLEDGE OF LANGUAGE: ITS NATURE, ORIGIN, AND USE. Noam Chomsky. Greenwood Press, 1986.

LESION ANALYSIS IN NEUROPSYCHOLOGY. Hanna Damasio and Antonio R. Damasio. Oxford University Press, 1989.

NEURAL REGIONALIZATION OF KNOWLEDGE ACCESS: PRELIMINARY EVIDENCE. A. R. Damasio, H. Damasio, D. Tranel and J. P. Brandt in *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, Vol. LV: *The Brain*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990.

APHASIA. A. R. Damasio in *New England Journal of Medicine*, Vol. 326, No. 8, pages 531-539; February 20, 1992.

AN INTRODUCTION TO LANGUAGE. Victoria Fromkin and Robert Rodman. Harcourt Brace Jovanovich College Publications, 1992.

ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ И РАЗУМ

WORKING MEMORY. Alan Baddeley. Oxford University Press, 1986.

CIRCUITRY OF PRIMATE PREFRONTAL CORTEX AND REGULATION OF BEHAVIOR BY REPRESENTATIONAL MEMORY. P. S. Goldman-Rakic in *Handbook of Physiology*, Section 1, Vol. 5; *Higher Functions of the Brain*, Part 1. Edited by Fred Plum. Bethesda, Md., American Physiological Society, 1987.

MNEMONIC CODING OF VISUAL SPACE IN THE MONKEY'S DORSOLATERAL PREFRONTAL CORTEX. Shintaro Funahashi, Charles J. Bruce and Patricia S. Goldman-Rakic in *Journal of Neurophysiology*, Vol. 61, No. 2, February 1989.

PREFRONTAL CORTICAL DYSFUNCTION IN SCHIZOPHRENIA: THE RELEVANCE OF WORKING MEMORY. Patricia S. Goldman-Rakic in *Psychopathology and the Brain*. Edited by Bernard J. Carroll and James E. Barrett. Raven Press, 1991.

ПОЛОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ МОЗГА

SEX DIFFERENCES IN THE BRAIN: THE RELATION BETWEEN STRUCTURE AND FUNCTION. Edited by G. J. DeVries, J.P.C. DeBruin, H.B.M. Uylings and M. A. Corner in *Progress in Brain Research*, Vol. 61, Elsevier, 1984.

MASCULINITY/FEMININITY. Edited by J. M. Reinisch, L. A. Rosenblum and S. A. Sanders. Oxford University Press, 1987.

BEHAVIORAL ENDOCRINOLOGY. Edited by Jill B. Becker, S. Marc Breedlove and David Crews. The MIT Press/Bradford Books, 1992.

ВАЖНЕЙШИЕ ПСИХИЧЕСКИЕ РАССТРОЙСТВА И МОЗГ

INTERACTIONS BETWEEN GLUTAMATERGIC AND MONOAMINERGIC SYSTEMS WITHIN THE BASAL GANGLIA—IMPLICATIONS FOR SCHIZOPHRENIA AND PARKINSON'S DISEASE. M. Carlsson and A. Carlsson in *Trends in Neurosciences*, Vol. 13, No. 7, pages 272-276; July 1990.

GENETIC MAPPING OF COMMON DISEASES: THE CHALLENGES OF MANIC-DEPRESSIVE ILLNESS AND SCHIZOPHRENIA. E. S. Gershon, M. Martinez, L. R. Goldin and P. V. Gejman in *Trends in Genetics*, Vol. 6, No. 9, pages 282-287; September 1990.

MANIC-DEPRESSIVE ILLNESS. Frederick K. Goodwin and Kay Redfield Jamison. Oxford University Press, 1990.

THE BIOCHEMICAL BASIS OF NEUROPHARMACOLOGY. Jack R. Cooper, Floyd E. Bloom and Robert H. Roth. Oxford University Press, 1991.

THE CONCEPTS OF STRESS AND STRESS SYSTEM DISORDERS: OVERVIEW OF PHYSICAL AND BEHAVIORAL HOMEOSTASIS. George P. Chrousos and Philip W. Gold in *Journal of the American Medical Association*, Vol. 267, No. 9, pages 1244-1252; March 4, 1992.

СТАРЕЮЩИЙ МОЗГ

ТУГКШТ ТГЪИУКЪ ФТВ ВУТКШЕШС УЧЕУТЕ ШТ ТШКЪД ФПШТИ ФТВ ФЛЯРУШУКЪ ВШУФУ. З. В. Сцд-уфт фТВ В. П. Адшшв шт *Neurobiology of Aging*, Vol. 8, No. 6, pages 521-545; November/December 1987.

THE RETARDATION OF AGING AND DISEASE BY DIETARY RESTRICTION. Richard Weindruch and Roy L. Walford. Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1988.

RNA AND PROTEIN METABOLISM IN THE AGING BRAIN. Caleb E. Finch and David G. Morgan in *Annual Review of*

Neuroscience, Vol. 13. Edited by W. M. Cowan et al. Annual Reviews Inc., 1990.

LONGEVITY, SENESCENCE, AND THE GENOME. Caleb E. Finch. University of Chicago Press, 1990.

THE MOLECULAR PATHOLOGY OF ALZHEIMER'S DISEASE. Dennis J. Selkoe in *Neuron*, Vol. 6, No. 4, pages 487-498; April 1991.

BRAIN AGING AND ALZHEIMER'S DISEASE: "WEAR AND TEAR" VS. "USE IT OR LOSE IT". D. F. Swaab in *Neurobiology of Aging*, Vol. 12, No. 4, pages 317-324; July/August 1991.

КАК ОБУЧАЮТСЯ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

LEARNING REPRESENTATIONS BY BACK-PROPAGATING ERRORS. David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton and Ronald J. Williams in *Nature*, Vol. 323, No. 6188, pages 533-536; October 9, 1986.

CONNECTIONIST LEARNING PROCEDURES. Geoffrey E. Hinton in *Artificial Intelligence*, Vol. 40, Nos. 1-3, pages 185-234; September 1989.

INTRODUCTION TO THE THEORY OF NEURAL COMPUTATION. J. Hertz, A. Krogh and R. G. Palmer. Addison-Wesley, 1990.

THE COMPUTATIONAL BRAIN. Patricia S. Churchland and Terrence J. Sejnowski. The MIT Press/Bradford Books, 1992.

ПРОБЛЕМА СОЗНАНИЯ

PERCEPTION. Irvin Rock. Scientific American Library, 1984.

CONSCIOUSNESS AND THE COMPUTATIONAL MIND. Ray Jackendoff. The MIT Press/Bradford Books, 1987.

COLD SPRING HARBOR SYMPOSIA ON QUANTITATIVE BIOLOGY, Vol. LV: THE BRAIN. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990.

TOWARDS A NEUROBIOLOGICAL THEORY OF CONSCIOUSNESS. Francis Crick and Christof Koch in *Seminars in the Neurosciences*, Vol. 2, pages 263-275; 1990.

THE COMPUTATIONAL BRAIN. Patricia S. Churchland and Terrence J. Sejnowski. The MIT Press/Bradford Books, 1992.

СКОЛЬКО ВИДОВ НАСЕЛЯЕТ ЗЕМЛЮ?

HOW MANY SPECIES? Robert M. May in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 330, Series B, pages 293-304; November 29, 1990.

INSECT ABUNDANCE AND DIVERSITY IN THE DUMOGA-BONE NATIONAL PARK, N. SULAWESI. Peter M. Hammond in *Insects and the Rain Forests of South East Asia (Wallacea)*. Edited by W. J. Knight and J. D. Holloway. Royal Entomological Society of London, 1990.

FROM GENES TO ECOSYSTEMS: A RESEARCH AGENDA FOR BIODIVERSITY. Report of an IUBS-UNESCO Workshop. Edited by Otto T. Solbrig. Paris, International Union of Biological Scientists, 1991.

TAXONOMY OF TAXONOMISTS. Kevin J. Gaston and Robert M. May in *Nature*, Vol. 356, No. 6367, pages 281-282; March 26, 1992.

КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ

THE CODEBREAKERS: THE STORY OF SECRET WRITING. David Kahn. Macmillan, 1967.

MODERN CRYPTOLOGY: A TUTORIAL. Gilles Brassard in *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 325. Springer-Verlag, 1988.

QUANTUM CRYPTOGRAPHY BASED ON BELL'S THEOREM. Artur K. Ekert in *Physical Review Letters*, Vol. 67, No. 6, pages 661-663; August 5, 1991.

EXPERIMENTAL QUANTUM CRYPTOGRAPHY. Charles H. Bennett, Francois Bessette, Gilles Brassard, Louis Salvail and John Smolin in *Journal of Cryptology*, Vol. 5, No. 1, pages 3-28; 1992.

QUANTUM CRYPTOGRAPHY WITHOUT BELL'S THEOREM. Charles H. Bennett, Gilles Brassard and N. David Mermin in *Physical Review Letters*, Vol. 68, No. 5, pages 557-559; February 3, 1992.

ГОРНАЯ БОЛЕЗНЬ

HIGH ALTITUDE PHYSIOLOGY. Edited by John B. West. Van Nostrand Reinhold, 1981.

THE MONTGOLFIER BROTHERS AND THE INVENTION OF AVIATION, 1783-1784. Charles S. Gillespie. Princeton University Press, 1983.

GOING HIGHER: THE STORY OF MAN AND ALTITUDE. Charles S. Houston. Little, Brown and Company, 1987.

HIGH ALTITUDE MEDICINE AND PHYSIOLOGY. Michael P. Ward, James S. Milledge and John B. West. University of Pennsylvania Press, 1989.

ГИСТОНЫ КАК РЕГУЛЯТОРЫ ГЕНОВ

EXTREMELY CONSERVED HISTONE H4 N TERMINUS IS DISPENSABLE FOR GROWTH BUT ESSENTIAL FOR REPRESSING THE SILENT MATING LOCI IN YEAST. Paul S. Kayne, Ung-Jin Kim, Min Han, Janet R. Mullen, Fuminori Yoshizaki and Michael Grunstein in *Cell*, Vol. 55,

pages 27-39; October 7, 1988.

NUCLEOSOME LOSS ACTIVATES YEAST DOWNSTREAM PROMOTERS IN VIVO. Min Han and Michael Grunstein in *Cell*, Vol. 55, pages 1137-1145; December 23, 1988.

YEAST HISTONE H4 N-TERMINAL SEQUENCE IS REQUIRED FOR PROMOTER ACTIVATION IN VIVO. Linda K. Durrin, Randall K. Mann, Paul S. Kayne and Michael Grunstein in *Cell*, Vol. 65, pages 1023-1031; June 14, 1991.

CHROMATIN AS AN ESSENTIAL PART OF THE TRANSCRIPTIONAL MECHANISM. Gary Felsenfeld in *Nature*, Vol. 355, No. 6357, pages 219-223; January 16, 1992.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ АЛМАЗНЫЕ ПЛЕНКИ

DIAMONDS. Eric Bruton. Radnor, Pa., Chilton Book Company, 1978.

LOW-PRESSURE, METASTABLE GROWTH OF DIAMOND AND "DIAMOND-LIKE" PHASES. John C. Angus and Cliff C. Hayman in *Science*, Vol. 241, No. 4868, pages 913-921; August 19, 1988.

APPLICATIONS OF DIAMOND FILMS AND RELATED MATERIALS. Edited by Y. Tzeng, M. Yoshikawa, M. Murakawa and A. Feldman. Elsevier, 1991.

DIAMOND CHEMICAL VAPOR DEPOSITION. F. G. Celii and J. E. Butler in *Annual Review of Physical Chemistry*, Vol. 42. Annual Reviews, Inc., 1991.

LARGE BANDGAP ELECTRONIC MATERIALS AND COMPONENTS. Special issue of *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No. 5; 1991.

METASTABLE GROWTH OF DIAMOND AND DIAMOND-LIKE PHASES. J. C. Angus, Y. Wang and M. Sunkara in *Annual Review of Material Science*, Vol. 21, Annual Reviews, Inc., 1991.

Л. Л. Буйнов, А. Е. Алексенко, А. А. Ботев, Б. В. Спшын. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА СЛОЕВ АЛМАЗА ИЗ АКТИВИРУЕМОЙ ГАЗОВОЙ ФИЗИКИ. — Доклады АН СССР, 1986, т. 287, № 4, с. 888—891.

АЛМАЗЫ МОЖЕТ ВЫРАСТИТЬ КАЖДЫЙ. — Наука и жизнь, 1991, № 11, с. 127.

А. Е. Алексенко, В. В. Спшын. SEMICONDUCTING DIAMONDS MADE IN THE USSR in: "Diamond, diamond-like and related coatings", ed. by R. K. Bachmann and A. Matthews, Elsevier, Amsterdam, 1991, p. 705—709.

ПОЮЩИЕ ГУСЕНИЦЫ, МУРАВЬИ И СИМБИОЗ

THE EVOLUTION AND BIOGEOGRAPHY OF ASSOCIATIONS BETWEEN LYCAENID BUTTERFLIES AND ANTS. N. E. Pierce in *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, Vol. 4. Oxford University Press, 1987.

THE LARVAL ANT-ORGANS OF *THISBE IRENEA* (LEPIDOPTERA: RIODINIDAE) AND THEIR EFFECTS UPON ATTENDING

ANTS. P. J. DeVries in *Zoological Journal of the Linnean Society*, Vol. 94, No. 4, pages 379-393; December 1988.

BUTTERFLY EXPLOITATION OF AN ANT-PLANT MUTUALISM: ADDING INSULT TO HERBIVORY. P. J. DeVries and I. Baker in *Journal of the New York Entomological Society*, Vol. 97, No. 3, pages 332-340; July 1989.

HOST SPECIFICITY AMONG *MACULINEA* BUTTERFLIES IN *MYRMICA* ANT NESTS. J. A. Thomas, G. W. Elmes, J. C. Wardlaw and M. Woyciechowski in *Oecologia*, Vol. 79, No. 4, pages 452-457; June 1989.

ENHANCEMENT OF SYMBIOSES BETWEEN BUTTERFLY CATERPILARS AND ANTS BY VIBRATIONAL COMMUNICATION. P. J. DeVries in *Science*, Vol. 248, No. 4959, pages 1104-1106; June 1, 1990.

THE MUTUALISM BETWEEN *THISBE IRENEA* BUTTERFLIES AND ANTS, AND THE ROLE OF ANT ECOLOGY IN THE EVOLUTION OF LARVAL-ANT ASSOCIATIONS. P. J. DeVries in *Biological Journal of the Linnean Society*, Vol. 43, No. 3, pages 179-195; July 1991.

ГОМИНИДЫ-ПАДАЛЬЩИКИ И ЭВОЛЮЦИЯ ЧЕЛОВЕКА

THE SERENGETI LION: A STUDY OF PREDATOR-PREY RELATIONS. George B. Schaller. University of Chicago Press, 1976.

SERENGETI: DYNAMICS OF AN ECOSYSTEM. A. R. Sinclair and M. Norton-Griffiths. University of Chicago Press, 1984.

LAST DAYS IN EDEN. Elspeth Huxley and Hugo Van Lawick. Amaryllis Press, 1984.

ANOTHER UNIQUE SPECIES: PATTERNS IN HUMAN EVOLUTIONARY ECOLOGY. Robert Foley. John Wiley and Sons, Inc., 1987.

THE FIRST TECHNOLOGY. Nicholas Toth in *Scientific American*, Vol. 256, No. 4, pages 112-121; April 1987.

О РЕФОРМЕ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В США

IN THE NATIONAL INTEREST: THE FEDERAL GOVERNMENT IN THE REFORM OF K-12 MATH AND SCIENCE EDUCATION. Task Force on K-12 Mathematics and Science Education. Carnegie Commission on Science, Technology and Government, September 1991.

THE REFORM OF SCIENCE EDUCATION IN THE U. S. A.: DÉJÀ VU OR DE NOVO? Senta A. Raizen in *Studies in Science Education*, Vol. 19, pages 1-41; 1991.

STRATEGY FOR ACHIEVING EXCELLENCE IN STATE GOVERNMENT. John H. Bishop. Working Paper No. 91-24. Center for Advanced Human Resource Studies, Cornell University, 1991.

Перечень статей, опубликованных в журнале «В мире науки» в 1992 г.

ЯНВАРЬ

Франклин Э. Зимринг ОГНЕСТРЕЛЬНОЕ ОРУЖИЕ, НАСИЛИЕ И СОЦИАЛЬНАЯ ПОЛИТИКА, с. 6
Ханс Гутброд, Хорст Штокер УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ, с. 16
Деннис Дж. Селко АМИЛОИДНЫЙ БЕЛОК И БОЛЕЗНЬ АЛЬЦГЕЙМЕРА, с. 28
Доминик Ман-Кит Лэм, Брайант У. Росситер ХРОМОСКЕДАСИЧЕСКАЯ ЖИВОПИСЬ, с. 38
Джек Л. Джемелл, Джеймс П. Харбисон, Аксель Шерер МИКРОЛАЗЕРЫ, с. 44
Говард Грин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КУЛЬТУР КЛЕТОК ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ, с. 52
Луиджи Лука Кавалли-Сфорца ГЕНЫ, НАРОДЫ, ЯЗЫКИ, с. 62
Кори с. Пауэлл ОТРАЖЕННЫЙ КОСМОС, с. 71

ФЕВРАЛЬ

Эллен Л. Бассук БЕЗДОМНЫЕ СЕМЬИ, с. 6
Джонатан Дж. Халлиуэлл КВАНТОВАЯ КОСМОЛОГИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ, с. 16
Дейвид У. Голд СТВОЛОВЫЕ КЛЕТКИ, с. 26
Дейвид Энтони, Д. Я. Телегин, Доркас Браун ЗАРОЖДЕНИЕ ВЕРХОВОЙ ЕЗДЫ, с. 36
Израэль Достровский ХИМИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО ОТ СОЛНЦА, с. 44
Роджер С. Сеймур АВСТРАЛИЙСКАЯ КУСТАРНИКОВАЯ ИНДЕЙКА, с. 52
Эми Дайан Дальмедико СОФИ ЖЕРМЕН, с. 60
Пол Уоллич КРЕМНИЕВЫЕ СОЗДАНИЯ, с. 68

МАРТ

Факри А. Баззас, Эрик Д. Файер ЖИЗНЬ РАСТЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, с. 6
Мартин К. Гутцвиллер КВАНТОВЫЙ ХАОС, с. 14
Густав Э. Линхард, Ян У. Слот, Дейвид Э. Джеймс, Майк М. Мьюклер КАК КЛЕТКИ ПОГЛОЩАЮТ ГЛЮКОЗУ, с. 22
Джон К. Каннищо, Роналд Х. Кейтчек АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ, с. 30
Кеннет Дж. Лохманн КАК ОРИЕНТИРУЮТСЯ МОРСКИЕ ЧЕРЕПАХИ, с. 40
Р. Брайен Фергусон ПЛЕМЕННЫЕ ВОЙНЫ, с. 50

Эммануэль Десурвир СВЕТОВОДНАЯ СВЯЗЬ: ПЯТОЕ ПОКОЛЕНИЕ, с. 58
Джон Ренни ЖИВУЩИЕ ВМЕСТЕ, с. 68

АПРЕЛЬ

Натан Каплан, Марселла Х. Чой, Джон К. Уитмор БЕЖЕНЦЫ ИЗ ЮГОВОСТОЧНОЙ АЗИИ И УСПЕХИ В УЧЕБЕ, с. 6
Патриция Фрайер ГРЯЗЕВЫЕ ВУЛКАНЫ В РАЙОНЕ МАРИАНСКИХ ОСТРОВОВ, с. 14
Ланс А. Лиотта ИНВАЗИЯ И МЕТАСТАЗИРОВАНИЕ РАКОВЫХ КЛЕТОК, с. 22
Герхард Шторк МЛЕКОПИТАЮЩИЕ ОСТРОВНОЙ ЕВРОПЫ, с. 32
Стивен Чу ЛАЗЕРНЫЙ ЗАХВАТ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, с. 41
Герман Харботл, Фил Уэйганд БИРЮЗА В ДОКОЛУМБОВОЙ АМЕРИКЕ, с. 50
Диана Б. Пол, Костас Б. Кримбас НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ТИМОФЕЕВ—РЕСОВСКИЙ, с. 58
Элизабет Коркоран СОВЕРШЕНСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, с. 69

МАЙ

Джеффри Сакс ПОЛЬША НА ПУТИ К РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКЕ, с. 6
Эрвин Неер, Берт Сакман МЕТОД ПЭТЧ-КЛАМП, с. 16
Дейвид Н. Спергел, Нейл Дж. Турок ТЕКСТУРА И СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ, с. 28
Джун-ити Анхара ПОЧЕМУ УСТОЙЧИВЫ АРОМАТИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ? с. 38
Фриц Фольрат ПАУЧЬИ СЕТИ И ШЕЛК, с. 46
Джерри Силверман, Джонатан М. Муни, Фриман Д. Шеперд ИНФРАКРАСНЫЕ ВИДЕОКАМЕРЫ, с. 56
Тимоти Тейлор КОТЕЛ ИЗ ГУНДЕСТРУПА, с. 64
Рассел Рутен В ПОИСКАХ ВОЛН, с. 72

ИЮНЬ

Аллан К. Уилсон, Ребекка Л. Канн НЕДАВНЕЕ АФРИКАНСКОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛЮДЕЙ, с. 8
Аллан Дж. Торн, Милфорд Х. Уолпофф МУЛЬТИРЕГИОНАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА, с. 14
Дж. Брендан Мерфи, Р. Дамиан Нанс ГОРНЫЕ ПОЯСА И СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ ЦИКЛ, с. 22
Говард М. Джонсон, Джеффри К. Рассел, Карол Х. Понцер СУПЕРАНТИГЕНЫ И БОЛЕЗНИ ЧЕЛОВЕКА, с. 32

Роберт У. Конн, Валерий Алексеевич Чуянов, Нобойюке Иное, Доналд Р. Свитмен МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РЕАКТОР, с. 43
Джон Мьюриг Томас ТВЕРДЫЕ КИСЛОТНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ, с. 52
Роналд Мелзак ФАНТОМНЫЕ КОНЕЧНОСТИ, с. 62
Дебора Эрикссон РАЗРЕЗАНИЕ ГЕНОМА, с. 72

ИЮЛЬ

Рой М. Андерсон, Роберт М. Мей МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАНДЕМИИ СПИДА, с. 6
Соломон Х. Снайдер, Дейвид С. Бредт БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ОКИСИ АЗОТА, с. 16
Ноам Соукер ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ, с. 26
Вилаянур С. Рамачандран СЛЕПЫЕ ПЯТНА, с. 36
Уилфрид Б. Велдкамп, Томас Дж. Макхью БИНАРНАЯ ОПТИКА, с. 44
Джон Тербор ПОЧЕМУ ИСЧЕЗАЮТ АМЕРИКАНСКИЕ ПЕВЧИЕ ПТИЦЫ, с. 52
Дейвид К. Кассиди ГЕЙЗЕНБЕРГ. ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ, с. 62
Филип Э. Росс КРАСНОРЕЧИВЫЕ ОСТАТКИ, с. 72

АВГУСТ

Эрик Дж. Чейссон ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ С КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «ХАББЛ», с. 6
Ричард М. Лон ЛИПОПРОТЕИН(А) В ЗАБОЛЕВАНИЯХ СЕРДЦА, с. 16
Чарлз С. Гассер, Роберт Т. Фрейли ТРАНСГЕННЫЕ КУЛЬТУРНЫЕ РАСТЕНИЯ, с. 24
Патриция Рифф Анауолт, Френсис Ф. Берлан КОДЕКС МЕНДОСЫ, с. 33
Константин К. Лихарев, Торд Клаесон ОДНОЭЛЕКТРОНИКА, с. 42
Уильям Дж. Уинклер, Конрад Бегель БОРЬБА С БЕШЕНСТВОМ ДИКИХ ЖИВОТНЫХ, с. 50
Роберт Репетто ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ В СИСТЕМЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТОВ, с. 60
Элизабет Коркоран РЕОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, с. 68

СЕНТЯБРЬ—ОКТАБРЬ

Ричард Х. Гроуз ЗАРОЖДЕНИЕ НА ЗАПАДЕ ДВИЖЕНИЯ В ЗАЩИТУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, с. 6
Пол Дж. Фейган, Майкл Д. Уорд ПОСТРОЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ, с. 14
Морин Э. Линдер, Альфред Г. Гилман С-БЕЛКИ, с. 22

Джон Х. Холланд ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ, с. 32
Майкл Филлипс АНАЛИЗ ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА В МЕДИЦИНЕ, с. 42
Уильям Э. Дуэلمان РЕПРОДУКТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ ЛЯГУШЕК, с. 52
Николс Тот, Деймонд Кларк, Жанкарло Лигабу ПОСЛЕДНИЕ ИЗГОТОВИТЕЛИ КАМЕННЫХ ТОПОРОВ, с. 62
Джон Хорган КВАНТОВАЯ ФИЛОСОФИЯ, с. 70
Джон Дж. Дворак, Карл Джонсон, Роберт И. Тиллинг ДИНАМИКА ВУЛКАНА КИЛАУЭА, с. 82
Эрнст Теодор Ритшел, Хельмут Браде БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ЭНДОТОКСИНЫ, с. 92
Стивен Дж. Браш КАК КОСМОЛОГИЯ СТАЛА НАУКОЙ, с. 102
Пол У. Шерман, Дженнифер Ю. М. Джарвис, Стантон Х. Брод ГОЛЫЕ ЗЕМЛЕКОПЫ, с. 110
Иан Таттерсолл «ЖИВОЕ» ОТОБРАЖЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ, с. 118
Диана Дьюч ПАРАДОКСЫ ВОСПРИЯ-

ТИЯ МУЗЫКАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ, с. 128
Дейвид Чом ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕДОСТУПНОСТИ ЛИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ, с. 136
Гэри Стикс ВОЗДУШНЫЕ ПОЕЗДА, с. 144
Рик Л. Риоло ЕСТЕСТВЕННЫЙ ОТБОР В МИРЕ БИТОВ, с. 160

НОЯБРЬ—ДЕКАБРЬ

Джеральд Д. Фишбах ПСИХИКА И МОЗГ, с. 10
Карла Дж. Шатц РАЗВИВАЮЩИЙСЯ МОЗГ, с. 23
Семир Зеки ЗРИТЕЛЬНЫЙ ОБРАЗ В СОЗНАНИИ И В МОЗГЕ, с. 33
Эрик Р. Кэндел, Роберт Д. Хокинс БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБУЧЕНИЯ И ИНДИВИДУАЛЬНОСТИ, с. 43
Антониу Р. Дамазиу, Анна Дамазиу МОЗГ И РЕЧЬ, с. 55
Патрисия С. Гольдман-Ракич ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ И РАЗУМ, с. 63
Дорин Кимура ПОЛОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ МОЗГА, с. 73
Эддиот С. Гершон, Рональд О. Ридер

ВАЖНЕЙШИЕ ПСИХИЧЕСКИЕ РАСТРОЙСТВА И МОЗГ, с. 83
Деннис Дж. Селко СТАРЕНИЕ МОЗГА, СТАРЕНИЕ РАЗУМА, с. 93
Джеффри Е. Хинтон КАК ОБУЧАЮТСЯ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, с. 103
Ф. Крик, К. Кох ПРОБЛЕМЫ СОЗНАНИЯ, с. 113
Роберт М. Мэй СКОЛЬКО ВИДОВ НАСЕЛЯЕТ ЗЕМЛЮ? с. 122
Чарльз Г. Беннет, Жиль Брассар, Артур К. Экерт КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ, с. 130
Чарльз С. Хьюстон ГОРНАЯ БОЛЕЗНЬ, с. 142
Майкл Гранстайн ГИСТОНЫ КАК РЕГУЛЯТОРЫ ГЕНОВ, с. 150
Майкл У. Гейс, Джон К. Анкус ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ АЛМАЗНЫЕ ПЛЕНКИ, с. 168
Роберт Дж. Блюменшайн, Джон А. Кавалло ГОМИНИДЫ-ПАДАЛЫШКИ И ЭВОЛЮЦИЯ ЧЕЛОВЕКА, с. 176
Тим Бердсли О РЕФОРМЕ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В США, с. 200

Коллектив редакции
выражает глубокую благодарность
кандидату биологических наук
ЗОЕ АЛЕКСАНДРОВНЕ ЗОРИНОЙ

за помощь в подготовке журнала «В мире науки» № 11 1992 г.

В МИРЕ НАУКИ

Учредитель:
ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Издание
зарегистрировано
в Госкомпечати СССР,
рег. № 1342
Подписано в печать 09.04.93.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90¼.
Гарнитуры таймс, гелиос.
Офсетная печать.
Объем 14,00 бум. л.
Бумага офсетная № 1.
Усл.-печ. л. 28,00.
Уч.-изд. л. 35,81.
Усл. кр.-отт. 113,25.
Изд. № 25/9064, 25/9065. Заказ № 859.
Тираж 8880 экз. С11, С12.
Издательство «Мир»
Министерства информации и печати
Российской Федерации
129820, ГСП, Москва, И-110,
1-й Рижский пер., 2.
Набрано в Фотоаборном центре
издательства «Мир»
Типография В/О «Внешторгиздат»
Министерства информации и печати
Российской Федерации
127576, Москва, Илимская, 7

