

ISSN 0032-874X

2 ПРИРОДА

1985



Ежемесячный
популярный
естественнонаучный
журнал
Академии наук СССР



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик
Н. Г. БАСОВ

Заместитель главного редактора
кандидат физико-математических наук
А. И. АНТИПОВ

Доктор физико-математических наук
Е. В. АРТЮШКОВ

Академик
Д. К. БЕЛЯЕВ

Член-корреспондент АН СССР
Р. Г. БУТЕНКО

Доктор географических наук
А. А. ВЕЛИЧКО

Академик
В. А. ГОВЫРИН

Член-корреспондент АН СССР
И. Р. ГРИГУЛЕВИЧ

Член-корреспондент АН СССР
Г. А. ЗАВАРЗИН

Член-корреспондент АН СССР
В. Т. ИВАНОВ

Доктор физико-математических наук
Н. П. КАЛАШНИКОВ

Доктор физико-математических наук
С. П. КАПИЦА

Академик
Б. М. КЕДРОВ

Доктор физико-математических наук
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Кандидат физико-математических наук
А. А. КОМАР

Академик
Н. К. КОЧЕТКОВ

Доктор геолого-минералогических наук
И. Н. КРЫЛОВ

Доктор философских наук
Н. В. МАРКОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. А. МЕДВЕДЕВ

Ответственный секретарь
В. М. ПОЛЫНИН

Доктор исторических наук
П. И. ПУЧКОВ

Заместитель главного редактора
академик
Ю. М. ПУЩАРОВСКИЙ

Доктор философских наук
Ю. В. САЧКОВ

Основан в 1912 году

Заместитель главного редактора
доктор биологических наук
А. К. СКВОРЦОВ

Академик АН УССР
А. А. СОЗИНОВ

Академик
В. Е. СОКОЛОВ

Доктор геолого-минералогических наук
М. А. ФАВОРСКАЯ

Заместитель главного редактора
кандидат технических наук
А. С. ФЕДОРОВ

Заместитель главного редактора
член-корреспондент АН СССР
Л. П. ФЕОКТИСТОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. Е. ХАИН

Член-корреспондент АН СССР
Р. Б. ХЕСИН

Доктор физико-математических наук
А. М. ЧЕРЕПАШУК

Доктор физико-математических наук
В. А. ЧУЯНОВ

На первой странице обложки. Безенгийский ледник (Центральный Кавказ). См. в номере: Дюргеров М. Б. Прогноз ледникового стока.

Фото В. Е. Гиппенрейтера.

На четвертой странице обложки. Старт космического корабля. Он был бы невозможен без использования процесса горения. См. в номере: Зельдович Я. Б., Либрович В. Б., Мержанов А. Г. Горение: современный взгляд на древнейший процесс.

Фото А. А. Пушкарёва (ТАСС).

В НОМЕРЕ

- Корогодин В. И.** Кариотаксоны, надежность генома и прогрессивная биологическая эволюция 3
- До сих пор остается спорным вопрос о прогрессивной эволюции генетического аппарата клетки. Результаты радиобиологических экспериментов позволяют предположить, что большую роль в такой эволюции играет надежность генома, т. е. его устойчивость к действию разных факторов, вызывающих нежелательные наследственные изменения.
- Летохов В. С.** Лазерная спектроскопия одиночных атомов и молекул 15
- Ступенчатая ионизация атомов или молекул с помощью нескольких лазерных фотонов, энергия которых точно совпадает с энергией возбужденных состояний частицы, позволяет детектировать очень малые количества вещества, в пределе — отдельный атом или молекулу, и определить их характеристики.
- Дородницын А. А.** Информатика: предмет и задачи 26
- К числу важнейших проблем современности относятся обеспечение модельными методами исследования описательных наук и автоматизация народного хозяйства. Таков спектр задач, решением которых занимается новая интегральная дисциплина информатика, использующая высокоразвитые технические, программные и алгоритмические средства.
- Зельдович Я. Б., Либрович В. Б., Мерджанов А. Г.** Горение: современный взгляд на древнейший процесс 30
- Процесс горения известен с древнейших времен, но в научных лабораториях он обнаруживает все новые и новые свойства. Их изучение позволило дать горению еще одну «профессию»: с его помощью сейчас синтезируются соединения, обладающие уникальными свойствами.
- Харкевич С. С., Крот В. Е.** Кольцевой хребет Кондер 44
- Это не только уникальное геологическое образование, но и перекресток, на котором соседствуют растения ближайших мест и совсем далеких территорий.
- Дюргеров М. Б.** Прогноз ледникового стока 47
- Земледелие на огромных засушливых территориях во многом зависит от воды, которую дают рекам горные ледники. Поэтому прогноз ледникового стока — важная научная и народнохозяйственная задача, к решению которой подошла современная гляциология.
- Негрук В. И.** Внеядерные геномы высших растений 60
- Изучение внеядерных геномов растительных органелл — митохондрий и хлоропластов — одно из новых направлений современной молекулярной биологии.
- Хитаров Н. И.** Подземный сверхглубокий полигон — лаборатория будущего 68
- Мы недопустимо мало знаем о процессах, происходящих в глубоких недрах Земли. Восполнить этот пробел могли бы комплексные исследования, организованные в подземном полигоне — лаборатории на глубине 5—6 км.
- Ройцин А. Б.** Измерение симметрии 73
- Можно ли измерить столь абстрактную характеристику, как симметрия, притом у микроскопических объектов, не наблюдаемых непосредственно? Методы современной радиоспектроскопии позволяют ответить на этот вопрос утвердительно.

Афанасьев Г. Е. Исчезнувшие народы. Буртасы**85**

Упомянутый в средневековой арабо-персидской литературе народ буртасов оказывается одним из аланских племен. На основании сравнительного изучения источников предполагается, что в VIII—X вв этот народ жил в лесостепной зоне Донецко-Донского междуречья.

Фейгенберг И. М. Принцип дополнительности в описании психических явлений**94**

Имеет ли сходство в описании психических и квантовомеханических явлений фундаментальную основу? Займет ли принцип дополнительности свое место в психологии? Если да, то можно будет считать, что физика вернула свой долг: ведь именно размышления о психических явлениях натолкнули Нильса Бора на идею дополнительности в квантовой механике.

Сапожников Г. Н. Голубой баран на Памире!**102**

Список млекопитающих нашей страны пополнился еще одним видом.

НОВОСТИ НАУКИ**104**

Запуски космических аппаратов в СССР (сентябрь—октябрь 1984 г.) (104) • Тепловое излучение Венеры (104) • Необычное поведение сейфертовской галактики NGC 4151 (104) • Толщина колец Сатурна (105) • Комета Джакобини — Циннера приближается (105) • Атомы в фотонной «бане» (106) • Запаздывающие тритоны испускаются ядрами лития (107) • Синтез в режиме горения (108) • Карбал — сверхтвердый композиционный материал (108) • Вакцинация людей с различными группами крови (108) • Загадки пола (109) • Дрожжевой белок, связывающий ионы кобальта (109) • Создаются новые биоспецифические материалы (110) • Причины образования метастазов (110) • Автоматический секвенатор ДНК (111) • Вирусы у Юрибейского мамонта (111) • Сравнительная эффективность групповых и индивидуальных решений (111) • Восприятие детьми необычных явлений (112) • Конкурентные отношения у паразитирующих личинок (112) • Размеры ареала и локальное обилие птиц (113) • Дунайский лес в опасности (113) • Крупнейший среди ихтиозавров (114) • От кого произошли страусы? (114) • Исследуется тройственная точка в Индийском океане (115) • Солнце, Луна и землетрясения (115) • Новые геологические карты (116) • Глубоководные залежи полиметаллических руд (116) • Высокоточное определение океанских глубин (117) • Метеоисследования в Арктике (117) • Наводнения зависят от Солнца? (118) • Надежность метеопрогноза в США (118) • От холодной зимы к ледниковому периоду? (118)

РЕЦЕНЗИИ

Скворцов А. К. История и эстетика русских садов (на кн.: Д. С. Лихачев. Поэзия садов)

119**НОВЫЕ КНИГИ****122**

Михайлов А. А. Земля и ее вращение (122) • **Амнуэль П. Р.** Небо в рентгеновских лучах (123) • Древний и средневековый Восток: история, филология (123)

В КОНЦЕ НОМЕРА

Кусов В. С. Старинные чертежи Москвы

124

Кариотаксоны, надежность генома и прогрессивная биологическая эволюция

В. И. Корогодин



Владимир Иванович Корогодин, доктор биологических наук, профессор. Руководит сектором биологических исследований Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). В 1957 г. обнаружил свойство живых клеток восстанавливаться от летальных повреждений, вызываемых ионизирующими излучениями. Основные работы — в области радиобиологии, радиационной генетики и теории информации. Автор книг: Проблемы пострадиационного восстановления. М., 1966; Применение принципа попадания в радиобиологии (совместно с Н. В. Тимофеевым-Ресовским и В. И. Ивановым). М., 1968 и др. Дважды публиковался в «Природе»: 1959, № 10 и 1968, № 10.

Наследственность, ее изменчивость и естественный отбор — вот тот фундамент, на котором строится здание будущей теории эволюции. Именно будущей — как отмечал Н. В. Тимофеев-Ресовский; послышки, содержащиеся в этой триаде, недостаточны, чтобы объяснить такой важнейший общепрограммный феномен, как прогрессивное развитие жизни¹.

Но дело не только в недостаточности посылок. В этой же работе Н. В. Тимофеев-Ресовский подчеркивал, что в теоретической биологии — а теория эволюции является главным ее разделом — еще не сформулированы определения ряда важнейших понятий и прежде всего понятия «биологический прогресс». Хотя интуитивно мы хорошо понимаем, что обычно называют этим термином, строгого определения прогрессивной биологической эволюции еще нет.

Сказанное справедливо также по отношению к ряду «ключевых событий» (так их можно называть), которые в ходе эволюции тех или иных групп организмов как бы внезапно, непредвиденно открывали новые пути для дальнейшего их развития. Те ключевые события, которые повышали общий

уровень организации живых существ, А. Н. Северцов называл ароморфозами. К таким событиям относятся изменения структурной организации генетического аппарата живых организмов, возникновение сексуальности с последующей дифференциацией полов и ряд других. Но дело в том, что повышение общего уровня организации, вызванное такими событиями, и, тем более, его эволюционное значение обычно выявлялось лишь спустя много поколений. Иными словами, преимущества, к которым приводили эти ключевые события, были их следствием, а не причиной, и не могли объяснить осуществление самих событий.

Однако, несмотря на семантические и логические трудности, связанные с определением базовых понятий теоретической биологии, прогрессивная биологическая эволюция — столь же очевидный факт, как и существование на нашей планете высших растений, млекопитающих и человека. Столь же несомненна связь — по крайней мере в большинстве случаев — прогрессивного развития с уже упоминавшимися и другими ключевыми событиями. И дело здесь не столько в поисках нового фактического материала, сколько в необходимости конкретизации форм этой связи и выявления причин, порождающих ключевые события. По-видимому, такая конкретизация приведет со временем к решению

¹ Тимофеев-Ресовский Н. В. Генетика, эволюция и теоретическая биология. — Природа, 1980, № 9, с. 62.

тех логических затруднений, о которых писал Н. В. Тимофеев-Ресовский.

В этой работе я хочу рассмотреть причины, которые в ходе эволюции могли приводить к повышению уровней структурной организации генетического аппарата клеток — генома, а также возможные эволюционные последствия таких событий. Исходным пунктом для рассмотрения этих вопросов нам послужит понятие «надежность генома» — так можно называть свойство, обуславливающее устойчивость генетического аппарата к неблагоприятным воздействиям. Если изменчивость генома поставляет материал для естественного отбора, то его надежность, уменьшая диапазон изменчивости, играет как бы стабилизирующую роль. Означает ли это, что надежность генома противостоит эволюции? Отнюдь нет: ниже будет показано, что в ряде случаев повышение надежности генома (вернее, те способы, которыми оно достигалось) вполне могли быть теми ключевыми событиями, которые открывали перед эволюцией новые пути.

МУТАГЕНЕЗ И НАДЕЖНОСТЬ ГЕНОМА

Как известно, у подавляющего большинства организмов наследственная, или генетическая, информация записана в молекулах дезоксирибонуклеиновой кислоты — ДНК. (У некоторых «мелких» вирусов носителями наследственной информации служат молекулы РНК.) Копирование генетического аппарата при размножении клеток и организмов не всегда абсолютно точное. С той или иной частотой в ходе копирования генома генетические структуры изменяются — возникают мутации.

Различают три основных вида мутаций — генные, хромосомные и геномные. Мутации генов (элементарных единиц наследственности) образуются в результате перестановки, выпадения или вставки отдельных нуклеотидов, слагающих молекулы ДНК. В случае мутаций хромосом (ядерных органелл, объединяющих всю совокупность генов) изменяются положения их участков (инверсии, симметричные обмены) или возникают различные аномалии (асимметричные обмены, делеции, фрагменты, кольца). Геномные мутации — это изменение числа хромосом в геноме.

Последствия разных мутаций для живых клеток и организмов различны. Так, мутации генов для клеток редко бывают смертельны: вызываемые ими изменения структур отдельных белков или регуляции

их синтеза в большинстве случаев совместимы с жизнеспособностью; не приводят к заметным изменениям количества ДНК в геноме. Мутации хромосом, напротив, часто вызывают гибель клеток, а также уменьшение или увеличение содержания в клетках ДНК. Геномные мутации или летальны, или сильно изменяют количество ДНК в клетках.

Прогрессивное развитие организмов, от первичных одноклеточных до высших растений и животных, сопровождалось увеличением в геноме количества ДНК: ведь чтобы обеспечить репродукцию генетического материала в более разнообразных и сложных условиях, необходимо большее количество наследственной информации. Вот почему крайние представители царства жизни по содержанию ДНК в геноме отличаются в миллионы и десятки миллионов раз. По-видимому, в ходе эволюции именно хромосомные и геномные мутации были одним из главных источников увеличения в клетках генетической информации, тогда как генным мутациям принадлежала ведущая роль в подгонке, шлифовке генотипов к изменяющимся условиям обитания.

Если принять, что частота возникновения мутаций на единицу количества ДНК постоянна, то можно ожидать, что с увеличением содержания в клетках ДНК вероятность появления мутантных генов и хромосом на одно деление клетки будет возрастать. Как это скажется на судьбе клеток, организмов и популяций? Большое количество мутаций может ускорить эволюцию, но в то же время повысит частоту летальных событий. Поэтому генетики давно пришли к выводу, что мутационный процесс должен так контролироваться естественным отбором, чтобы частота мутирования у разных организмов сохранялась в некотором оптимальном интервале².

Отрицательная роль слишком высокой мутабельности должна проявляться быстрее и ярче, чем отрицательные последствия излишне низкой частоты мутирования. Значит, контроль за мутабельностью со стороны естественного отбора направлен прежде всего на то, чтобы предотвратить ее повышение сверх некоторых предельно допустимых значений, пусть даже ценой снижения частоты мутирования ниже оптимального уровня. Другими словами, здесь

² Шапиро Н. И. — Зоол. ж., 1938, т. 17, с. 592; Берг Р. Л., Тимофеев-Ресовский Н. В. — Проблемы кибернетики, 1961, вып. 5, с. 183.

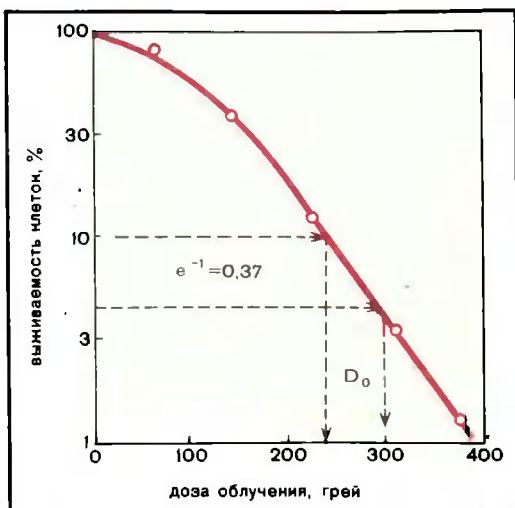
важно, чтобы надежность генома не была слишком низкой — а сколь она окажется высокой, уже менее существенно. Поэтому под надежностью генома будем понимать его устойчивость к действию разных факторов (эндогенной или экзогенной природы), вызывающих хромосомные и геномные мутации — основной источник летальных генетических изменений.

Инструментом, позволяющим определять надежность генома, может служить ионизирующее излучение. В опытах с действием на клетки ионизирующих излучений (γ -квантов или рентгеновских лучей) можно точно количественно охарактеризовать чувствительность клеток разных организмов и мутабельность их хромосом, что не всегда удается при использовании других мутагенов³. Анализ результатов радиобиологических экспериментов позволил нам ввести меру надежности генома и оценить надежность генома организмов, относящихся к разным таксономическим группам.

НАДЕЖНОСТЬ ГЕНОМА И КАРИОТАКСОНЫ

Гибель клеток при действии ионизирующих излучений обусловлена главным образом хромосомными мутациями, вызванными в основном разрывами молекул ДНК. Располагая кривыми выживания каких-либо клеток, можно рассчитать величину такой дозы облучения D_0 (измеряемой в греях), когда в каждой клетке в среднем возникает по одному летальному повреждению. Чем больше доза облучения, тем выше устойчивость клеток к облучению, т. е. их радиорезистентность, поэтому величина D_0 может служить мерой радиорезистентности клеток. В зависимости от радиорезистентности живые организмы можно разделить на четыре группы, называемые радиотаксонами⁴.

Уже давно обратили внимание на тот факт, что каждый радиотаксон объединяет организмы со сходной структурной организацией генетического аппарата⁵. По уров-



Выживание клеток при облучении γ -лучами. Показан способ расчета величины дозы облучения (D_0), отражающей радиорезистентность клеток. Величина D_0 равна дозе облучения, уменьшающей выживаемость клеток в e раз (e — основание натуральных логарифмов).

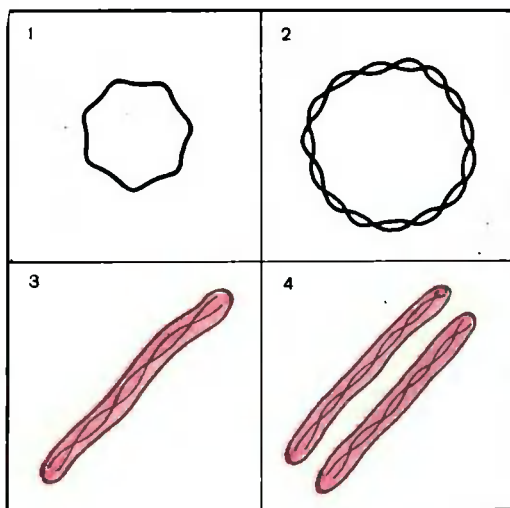


Схема строения основных форм структурной организации генетического аппарата клеток: 1 — однокитовые кольцевые молекулы РНК или ДНК (1-й кариотаксон); 2 — двукитовые кольцевые молекулы ДНК (2-й кариотаксон); 3 — двукитовые молекулы ДНК, организованные в хромосомы (3-й кариотаксон); 4 — удвоенные наборы хромосом (4-й кариотаксон).

³ Timofeeff-Ressovsky N. W. Experimentelle Mutationforschung in der Vererbungslehre. Dresden u. Leipzig, 1937.

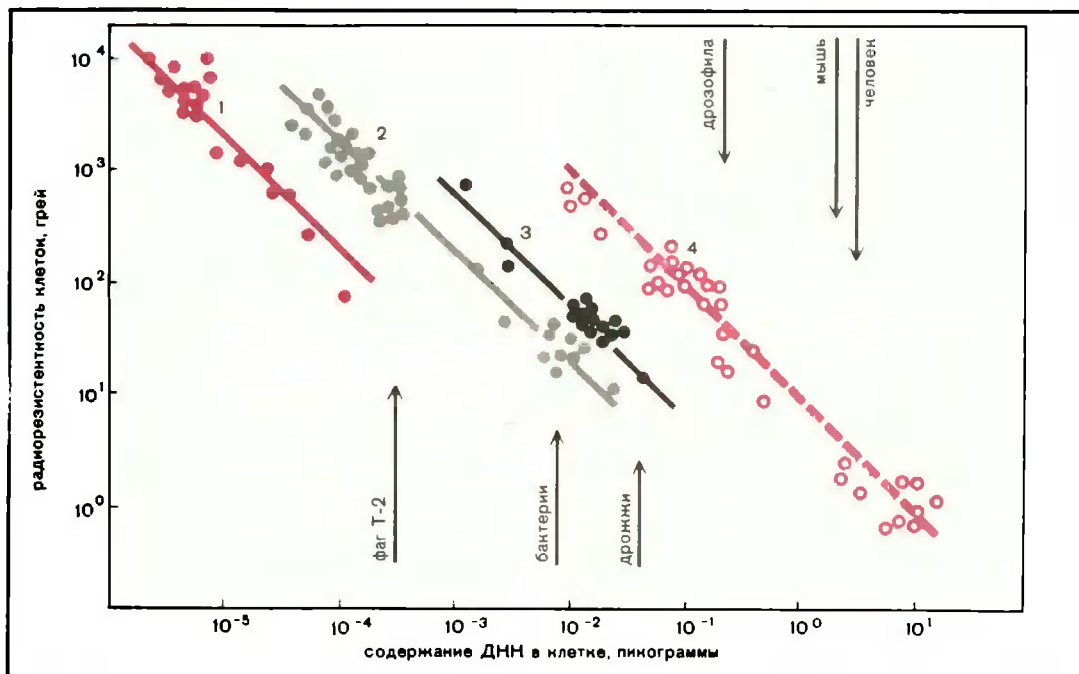
⁴ Термин «радиотаксон» был предложен английским радиобиологом А. Г. Спарроу (Sparrow A. H., Underbrink A. G., Sparrow R. C. — Radiation Res., 1967, v. 32, p. 915).

⁵ Kaplan H. C., Moses L. E. — Science, 1964, v. 145, p. 21; Савич А. В., Шальнов М. И. — В кн. Системы надежности клеток. Киев, 1977, с. 46.

ню структурной организации генетического аппарата большинство живых организмов также можно разделить на четыре группы, или кариотаксона. К 1-му кариотаксону относятся организмы, у которых геном представляет собой однокитовую кольцевую молекулу РНК или ДНК (некоторые «мелкие» вирусы); 2-й кариотаксон составляют организмы с двукитовой кольцевой молекулой ДНК (остальные вирусы, а также бактерии и синезеленые водоросли); 3-й кариотаксон включает в себя эвкариоты-гаплонты, у которых двукитовые молекулы

ваю здесь структурную организацию генома гиперпloidных и многоядерных простейших, а полипloidные растения отношу к 4-му кариотаксону, так как жизненный цикл у них такой же, что и у типичных эвкариот-диплontов.) Изучение зависимости радиочувствительности таких клеток от содержания в них ДНК показало, что каждый радиотаксон объединяет организмы, относящиеся преимущественно к одному и тому же кариотаксону.

Чем больше требуется энергии излучения, чтобы повредить генетический ап-



Зависимость радиорезистентности, измеряемой дозой облучения (D_{01}), от содержания ДНК в клетках микроорганизмов, растений и животных. Для групп клеток (радиотаксонов), которым соответствует каждая из прямых, радиорезистентность уменьшается пропорционально увеличению содержания ДНК. 1, 2, 3, 4 — номера радиотаксонов.

ДНК организованы в хромосомы, а вегетативно размножающиеся клетки содержат по одному набору таких хромосом (многие грибы и водоросли); наконец, к 4-му кариотаксону относятся эвкариоты-диплontы, у которых вегетативно размножающиеся клетки содержат по два идентичных набора хромосом (некоторые грибы и водоросли, а также все высшие растения и животные, включая человека). (Я не рассматри-

парат, тем он устойчивее, надежнее, поэтому надежность генома можно выражать в количестве энергии (обычно в электрон-вольтах), вызывающей в нем в среднем одно повреждение. Для оценки величины надежности генома можно использовать произведение $D_{01}C$, где C — содержание ДНК в клетке⁶. Среднее значение K этой величины для организмов, относящихся к одному кариотаксону, обозначает надежность генома организмов данного кариотаксона. При переходе от 1-го кариотаксона к 4-му надежность генома увеличивается почти в 600 раз (см. табл.).

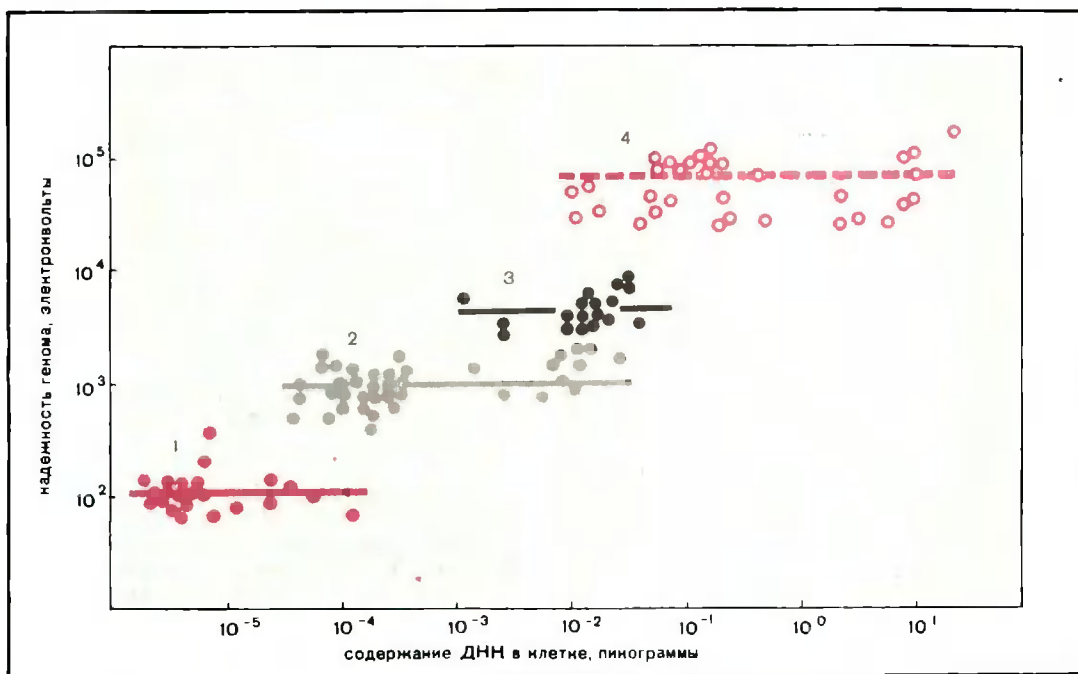
⁶ Корогодин В. И.— Радиобиология, 1982, т. 22, с. 147.

Таблица
Содержание ДНК и надежность генома у организмов разных кариотаксонов

Кариотаксон	Содержание ДНК на геном, пг	Надежность генома, $\cdot 100 \pm \sigma$
1	$10^{-6} - 10^{-4}$	1,2
2	$3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$	10,7
3	$10^{-3} - 10^{-1}$	45,8
4	$10^{-2} - 10^2$	610,5

действия ионизирующих излучений для клеток человека D_0 была бы близка к 0,01 Гр, что в сотни раз меньше, чем в действительности. Этого, однако, не происходит: сенсibilизирующий эффект увеличения содержания ДНК компенсируется ступенчатыми повышениями надежности генома при переходе от одного кариотаксона к другому.

Можно полагать, что в природных условиях уровень мутабельности у разных организмов обуславливается тремя основными факторами: величиной мутагенного



Зависимость надежности генома от содержания ДНК для организмов, относящихся к разным кариотаксонам. Для организмов, относящихся к одному и тому же кариотаксону, надежность генома колеблется около некоторого среднего значения, а при переходе от одного кариотаксона к другому быстро возрастает. 1, 2, 3, 4 — номера кариотаксонов.

С усложнением структурной организации генома содержание ядерной ДНК в клетках организмов от 1-го и до 4-го кариотаксона увеличивается на четыре-шесть порядков. Если бы надежность генома не зависела от уровня его структурной организации, то с увеличением содержания ДНК устойчивость клеток к мутагенам катастрофически бы уменьшалась: так, в случае

фона, надежностью генома и содержанием в нем ДНК. Если принять, что мутагенный фон в разных регионах Земли во все времена был примерно одинаков, остаются два последних фактора. Из определения надежности генома следует, что устойчивость клеток к мутагенным воздействиям, например к ионизирующим излучениям, равна $D_0 = K/C$. Так как слишком высокая мутабельность должна неблагоприятно сказываться на судьбе популяции, то величина D_0 не может быть меньше некоторого критического значения. В таком случае максимальное количество ДНК, которое может содержаться в геноме организмов, относящихся к данному кариотаксону (т. е. при данном значении его надежности K), не может превышать некоторой пороговой величины. Та-

кое максимально допустимое содержание ДНК будет определяться прежде всего надежностью генома и может увеличиваться только с увеличением его надежности: клетка не в состоянии содержать больше наследственной информации, чем допускает прочность ее носителя.

По мере увеличения, в ходе эволюции, количества ДНК в геноме у организмов данного кариотаксона, по мере его приближения к значению, когда уровень мутабельности угрожающе возрастал, надежность генома приобретала, по-видимо-

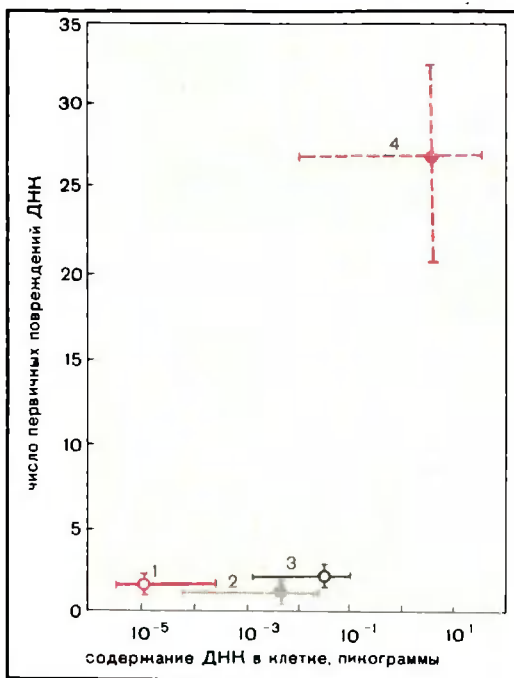
по меньшей мере три раза; особенно возросла надежность генома при переходе от эвкариот-гаплонтов к эвкариотам-диплонтам.

Конечно, нельзя считать, что эволюция шла по прямому пути от вирусоподобных организмов до высших растений и млекопитающих, а биологический прогресс был связан только с монотонным увеличением количества генетической информации. Организация генома предков современных прокариот еще дискутируется, а в ходе прогрессивной эволюции отдельных таксонов, по-видимому, количество ДНК на геном не только увеличивалось, но и уменьшалось⁷. Это, однако, не противоречит выводу, который можно сделать из сказанного выше: надежность генома — существенный фактор, лимитирующий сверху содержание в нем ДНК, а повышение надежности генома при переходе от одного кариотаксона к другому — необходимая предпосылка дальнейшего увеличения количества генетической информации. Такова возможная роль надежности генома в прогрессивной биологической эволюции.

ДИПЛОИД-СПЕЦИФИЧЕСКАЯ РЕПАРАЦИЯ И ЕЕ РОЛЬ В НАДЕЖНОСТИ ГЕНОМА

Высказанное выше положение, думаю, можно рассматривать как гипотезу, заслуживающую определенного внимания. Ведь хорошее соответствие кариотаксонов радиотаксонам не может быть простой случайностью — скорее всего, оно отражает общебиологическую закономерность. Поэтому вопрос о том, каковы механизмы, обеспечивающие повышение надежности генома с усложнением его структурной организации, также представляет большой интерес. При обсуждении этого вопроса мы опять обратимся к радиобиологии, сознавая, однако, что такой подход не столько даст нам окончательный ответ, сколько наметит пути дальнейших исследований.

Весьма обширные данные о возникновении одиночных и двойных разрывов ДНК при ее облучении в растворах и живых клетках позволяют считать⁸, что надежность генома у представителей 1-го и 2-го кариотаксонов имеет физико-химическую при-



Число первичных повреждений ДНК на геном при облучении дозой D_0 клеток организмов, относящихся к разным кариотаксонам [1, 2, 3, 4].

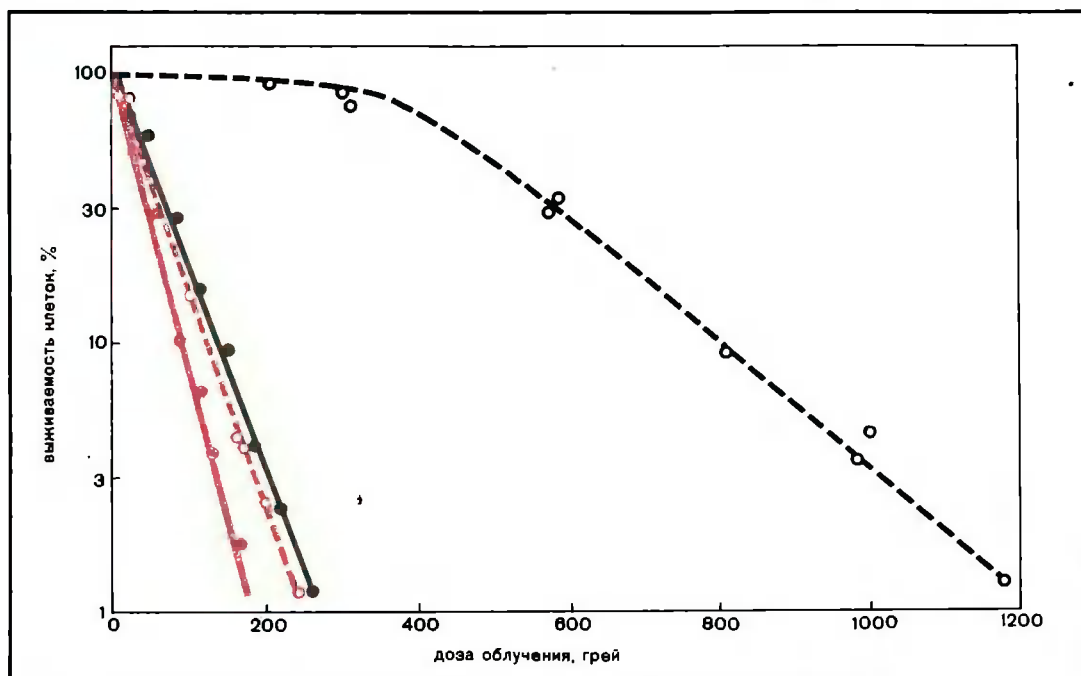
му, все большую селективную ценность. Можно думать, что в зоне «критической мутабельности» естественный отбор подхватывал и закреплял любые изменения в организации генома, повышающие его надежность. «Геномные ароморфозы», когда происходило резкое повышение его надежности, существенно сдвигали вверх границы предельно допустимого содержания ДНК и тем самым открывали новые возможности для последующего увеличения количества генетической информации. В ходе эволюции такие события происходили

⁷ Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. М., 1982; Шальнов М. И. — Радиобиология, 1977, т. 17, с. 652.

роду: чтобы получить одиночный разрыв в молекуле ДНК или РНК, вызывающий повреждение одонитевой молекулы нуклеиновой кислоты, необходима доза около 100 эВ, а для образования двойного разрыва (что приводит к повреждению двунитевой ДНК) нужно около 1000 эВ. Эти данные соответствуют значениям надежности генома этих организмов. У представителей 3-го кариотаксона более высокая надежность генома (около 5000 эВ) может быть обусловлена наличием белкового матрикса хромосом, благодаря чему для их повреж-

ко-химического фактора в обеспечении их надежности ведущая.

Совершенно другая ситуация в случае 4-го кариотаксона: здесь на одно биологически значимое повреждение приходится до 30—40 двойных разрывов ДНК. Так как строение хромосом у организмов 3-го и 4-го кариотаксонов идентично, то резкое повышение надежности генома (в 10—20 раз!) при переходе от гаплоидных к диплоидным клеткам эвкаріот физико-химическими факторами объяснить нельзя. Чем же обуславливается этот феномен?



Выживание гаплоидных (цветные линии) и диплоидных (черные линии) клеток дрожжей-сахаромикетов при действии ионизирующих излучений (пунктир) и тех же клеток, несущих мутацию (сплошные линии), которая блокирует диплоид-специфическую репарацию ДНК. Видно, что такие мутации мало сказываются на радиорезистентности гаплоидных клеток, но резко уменьшают устойчивость диплоидных клеток.

дения требуется больше энергии, чем для образования двойного разрыва в «голой» молекуле ДНК. Вот почему определение надежности генома по радиационно-химическим выходам первичных повреждений ДНК для первых трех кариотаксонов дает величины, близкие к единице, — роль физи-

При действии ионизирующих излучений более высокая надежность генома организмов 4-го кариотаксона проявляется в том, что диплоидные клетки эвкаріот значительно устойчивее к облучению, чем гаплоидные. Это хорошо видно на примере дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, природных диплонтон, у которых можно искусственно получать вегетативно размножающиеся гаплоидные клетки. Этот факт известен давно. Вначале его объясняли тем, что большинство облученных гаплоидных клеток погибает якобы за счет генных рецессивных летальных мутаций, которые «безвредны» для диплоидных клеток. Позже было обнаружено, что такие мутации при облучении возникают крайне редко, а лучевую гибель как гаплоидных, так и



Колонии облученных гаплоидных (вверху) и диплоидных (внизу) клеток дрожжей-сахаромицетов. Разные формы и размеры колоний у диплоидов свидетельствуют об образовании нестабильных мутантов.

диплоидных клеток дрожжей вызывают в основном однотипные повреждения, скорее всего, хромосомные мутации⁸. Но в диплоидных клетках содержится в два раза больше ДНК, чем в гаплоидных, и значит

такие повреждения у них должны возникать в два раза чаще. Почему же диплоидные клетки дрожжей-сахаромицетов устойчивее к облучению, чем гаплоидные?

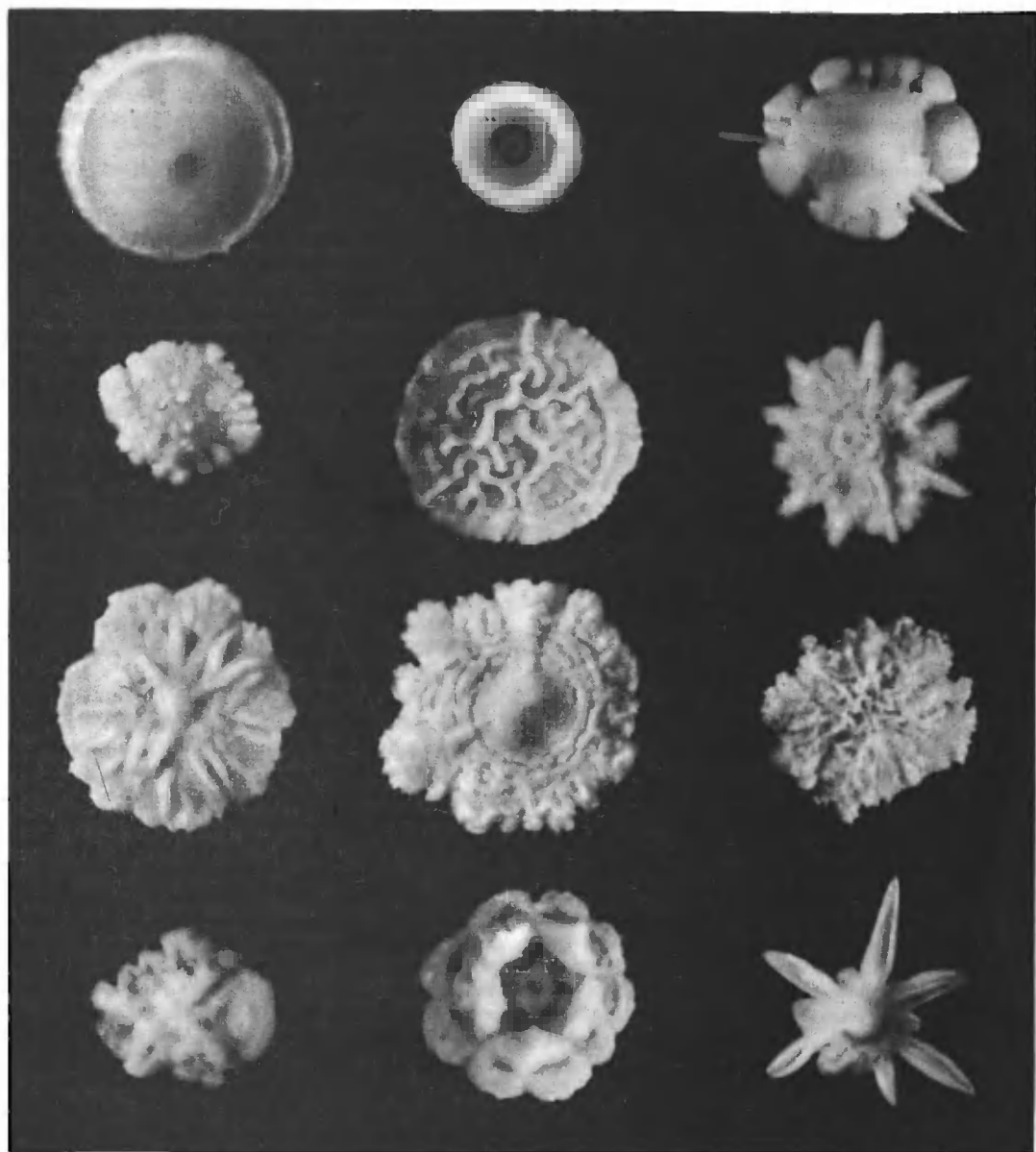
Еще в конце 50-х годов было установлено, что диплоидные клетки дрожжей-сахаромицетов, в отличие от гаплоидных, эффективно восстанавливаются от летальных лучевых повреждений. В ходе этого восстановления ликвидируются (репарируются) разрывы молекул ДНК⁹. Это позволяет считать, что высокая надежность генома у диплоидных клеток этих дрожжей (4-й кариотаксон) по сравнению с гаплоидными клетками этих же дрожжей (3-й кариотаксон) обуславливается диплоид-специфической репарацией, т. е. исправлением поврежденных участков ДНК, требующим для своего осуществления двух наборов хромосом.

Этот вывод хорошо подтверждается тем фактом, что у дрожжей-сахаромицетов мутации генов, контролирующих диплоид-специфическую репарацию ДНК, мало сказываются на радиорезистентности гаплоидных клеток, но резко уменьшают устойчивость к облучению клеток диплоидных. Репарация ДНК присуща и другим организмам, относящимся к 4-му кариотаксону, — дрозофиле, мыши, человеку. Во всех этих случаях мутации генов, нарушающие репарацию, увеличивают чувствительность к мутагенным воздействиям. Вероятно, диплоид-специфическая репарация ДНК обуславливает высокую надежность генома не только у диплоидных клеток дрожжей-сахаромицетов, но и у других представителей 4-го кариотаксона.

Репарация ДНК — процесс, в котором участвует большое число ферментов, синтез которых контролируется разными генами. Для диплоид-специфической репарации необходим не только полный комплект этих ферментов, но и двойной набор хромосом: неповрежденные участки одной из гомологичных хромосом служат как бы образцом для починки (с помощью ферментов) поврежденных участков другой. Если какое-либо из этих условий не соблюдается, диплоид-специфическая репарация не идет. Это означает, что в случае дефекта системы репарации диплоидные клетки эвкариот будут относиться не к 4-му, а к 3-му радиотаксону и, следовательно, будут более чувствительны к мутагенам, чем гаплоидные, в ядрах которых содержится в два раза меньше ДНК.

⁸ Корогодин В. И., Гудкова Н. К., Ближний К. М. — Радиобиология, 1978, т. 18, с. 516.

⁹ Корогодин В. И. Проблемы пострадиационного восстановления. М., 1966; Luchnik A. N., Glaser V. M., Shestakov S. V. — Molecular Biol. Rep., 1977, v. 3, p. 437.



Наглядная иллюстрация каскадного мутагенеза: после однократного облучения исходной клетки (вверху слева) из одного нестабильного клона образуется несколько новых рас диплоидных дрожжей.

Если предположение о селективной ценности надежности генома справедливо, то при отсутствии или дефекте репарационной системы гаплоидные клетки эвкариот должны иметь селективное преимущество перед диплоидными, у которых ча-

ще возникают летальные повреждения генетического аппарата. В таком случае можно ожидать, что существующие в природных условиях эвкариоты-гаплонты дефектны по системе репарации.

Для проверки этого предположения были использованы природные дрожжи-гаплонты *Pichia guilliermondii* и *Pichia pinus*¹⁰.

¹⁰ Корогодин В. И. и др.— Радиобиология, 1977, т. 17, с. 700.

Половой процесс присущ и дрожжам-диплонтам, и гаплонтам, только у первых зигота дает начало вегетативно размножающимся диплоидным клеткам, а у вторых вслед за копуляцией клеток-гамет происходит редукционное деление зиготы и прорастание вегетативно размножающихся половых клеток — аскоспор. Путем подбора состава питательной среды у дрожжей-гаплонтов были получены стабильные при длительном культивировании диплоидные клетки. Опыты показали, что у этих дрожжей диплоидные клетки почти в два раза чувствительнее к облучению, чем гаплоидные, т. е. и те и другие относятся к 3-му радиотаксону. Было также установлено, что диплоидные клетки дрожжей-гаплонтов не могут восстанавливаться от лучевых повреждений¹¹. Все это очень хорошо подтверждает предположение, что высокая надежность организмов 4-го кариотаксона обусловлена диплоид-специфической репарацией и имеет селективную ценность.

Диплоид-специфическая репарация у дрожжей, как и у других организмов, происходит при участии большого числа ферментов. Многие из этих ферментов необходимы и для других процессов жизнедеятельности. Отдельные ферменты репарационной системы первоначально возникли, скорее всего, независимо друг от друга, выполняя при этом различные функции. Только после того, как образовался полный набор ферментов, они смогли осуществлять совершенно новую функцию — восстанавливать от повреждений ДНК и хромосомы при наличии неповрежденных гомологов, т. е. в диплофазе жизненного цикла клеток. У гаплоидных клеток наличие полного набора репарационных ферментов мало сказывалось на их жизнеспособности, зато у диплоидных резко увеличивало надежность генома. Можно думать, что по крайней мере у некоторых одноклеточных эвкариот это сыграло решающую роль в переходе диплоидной зиготы к вегетативному размножению с последующей редукцией гаплофазы, т. е. к диплоидной форме вегетативной фазы жизненного цикла. Таков один из возможных путей возникновения в ходе эволюции эвкариот-диплонтот.

КАСКАДНЫЙ МУТАГЕНЕЗ У ДИПЛОИДНЫХ КЛЕТОК

Обратим теперь внимание на следующие хорошо известные факты. 1-й и 2-й

кариотаксоны представлены только одноклеточными организмами. В 3-й кариотаксон, наряду с одноклеточными, входят и многоклеточные организмы-гаплонты (некоторые водоросли), но это тупики эволюции, не давшие начала высшим формам жизни. Все высшие растения и животные относятся к 4-му кариотаксону, который объединяет подавляющее большинство эвкариот-диплонтот, от дрожжей до человека.

Это означает, что именно диплоидное состояние клеток в вегетативной фазе жизненного цикла послужило основой для расцвета прогрессивной эволюции. Действительно, решающее значение в переходе к высшим многоклеточным принадлежало морфофизиологической дифференциации гамет на мужские и женские с последующим формированием оогамии (когда мужские гаметы представляют собой сперматозоиды, а женские — яйцеклетки); оогамия, в свою очередь, явилась предпосылкой для возникновения эмбриогенеза. При редукционном делении зиготы, как это происходит у гаплонтов, это исключено.

Каждый очередной шаг эвкариот-диплонтот по пути прогрессивной эволюции был связан с увеличением генетической информации. Возможность этого, как мы видели, была создана диплоид-специфической репарацией, резко увеличившей надежность генома. Но для эволюции диплонтот характерна еще одна особенность — высокий темп наращивания количества ДНК. Если для увеличения содержания ДНК в клетках, как уже отмечалось, большое значение имеют хромосомные и геномные мутации, то следует ожидать, что и в этом отношении диплонтоты обладают каким-то преимуществом перед гаплонтотами. Посмотрим, так ли это, опять обратившись к результатам радиобиологических экспериментов.

Для гаплоидных клеток зависимость выживаемости от дозы облучения описывается экспоненциальной кривой, а для диплоидных, как правило, — кривой с «плечом». Мы уже отмечали, что в обоих случаях летальны хромосомные мутации, а различная радиочувствительность клеток обусловлена диплоид-специфической репарацией. Особенность же форм кривых выживания гаплоидных и диплоидных клеток отражают тот факт, что для первых абсолютна летальна практически любая хромосомная мутация, а для вторых единичные мутации лишь частично снижают жизнеспособность, и для того чтобы диплоидная клетка погибла, в ней должно возникнуть

¹¹ Глазунов А. В., Лобачевский П. Н. — Радиобиология, 1983, т. 23, с. 409.

два или больше таких повреждений¹². Это не связано с эффектом восстановления, а обусловлено тем, что повреждение одной из гомологичных хромосом обычно частично компенсируется его отсутствием у второй. Но самое замечательное здесь то, что диплоидные клетки с такими повреждениями, если они выживают, дают начало нестабильным клонам — т. е. семействам клеток, у которых мутации возникают во много раз чаще, чем у клеток, не несущих подобных повреждений. Это явление было впервые обнаружено Г. А. Надсоном и Г. С. Филипповым, а затем, много лет спустя, подробно изучалось в нашей лаборатории¹³.

Облученные гаплоидные клетки на агаризованной питательной среде дают одинаковые по размерам и форме колонии — такие же как и необлученные. Из облученных диплоидных клеток, напротив, вырастают колонии разных форм и размеров. Такие нестандартные колонии, образующиеся из отдельных частично поврежденных диплоидных клеток, содержат, как правило, большое число разных морфологических мутантов, одни из которых стабильны, а другие при последующих пересевах дают начало все новым и новым формам.

Облученные диплоидные клетки образуют нестабильные клоны очень часто — выход их может достигать 50 %! Процесс новообразования мутантов в нестабильных клонах может продолжаться очень долго, на протяжении сотен клеточных делений. В результате такого каскадного мутагенеза из одной исходной клетки после однократного облучения можно получить множество новых рас.

Каскадный мутагенез у диплоидных клеток вызывают не только ионизирующие излучения, но и другие повреждающие хромосомы воздействия — ультрафиолетовый свет, химические соединения, повышенная температура. Изредка нестабильные клоны возникают и спонтанно.

Вероятно, в основе каскадного мута-

генеза лежит хромосомная нестабильность всего генома. Пусковым событием здесь служит, скорее всего, мутация одной из хромосом, возникающая непосредственно при действии мутагена, что приводит генетический аппарат как бы в возбужденное состояние; начинается «слепой поиск», в ходе которого образуются самые разные хромосомные и геномные мутации, все новые перестройки генетического аппарата, продолжающиеся до тех пор, пока не сформируются стабильные комбинации. Число стабильных состояний для каждого генома, по-видимому, не так уж велико, что и позволяет часто наблюдать возникновение сходных вариантов. В эксперименте из чистой исходной культуры дрожжей можно получить такие же по внешнему виду расы, какие характерны для разных штаммов, видов и родов дрожжей природного происхождения. Здесь наблюдается прямая аналогия с законом гомологических рядов в наследственной изменчивости¹⁴.

Можно думать, что в ходе каскадного мутагенеза часто возникают хромосомные перестройки, приводящие к дупликациям — удвоениям относительно крупных участков отдельных хромосом. Об этом свидетельствует следующее. У гаплоидных клеток, как уже отмечалось, получить нестабильные клоны нельзя. Такие клоны, однако, весьма часто встречаются среди аскоспорового потомства нестабильных диплоидных клеток. Известно, что дупликации хромосом могут вызывать генетическую нестабильность даже у гаплоидных организмов. Можно думать, что, возникнув в диплоидной клетке и пройдя через мейоз (редукционное деление) при образовании аскоспор, такие дупликации и служат причиной нестабильности гаплоидных дрожжей, получаемых из аскоспор нестабильных диплоидных клеток.

Хотя опыты, результаты которых описаны выше, проводились только на дрожжевых организмах, на основании ряда косвенных данных можно предположить, что каскадный мутагенез свойствен диплоидным клеткам и других эвкариот. Следовательно, хромосомная нестабильность, легко индуцируемая у диплоидных клеток, может вносить существенный вклад в эволюцию геномов организмов 4-го кариотаксона по пути увеличения содержания генетической информации.

¹² Капulyцевич Ю. Г. Количественные закономерности лучевого поражения клеток. М., 1978.

¹³ Надсон Г. А., Филиппов Г. С. — Вестник рентгенол. и радиол., 1932, № 10, с. 275; Корогодин В. И., Близник К. М. — Радиобиология, 1972, т. 12, с. 163; Корогодин В. И., Близник К. М., Капulyцевич Ю. Г. — Там же, 1972, т. 12, с. 416; 1977, т. 17, с. 492; Толсторуков И. И., Близник К. М., Корогодин В. И. — Генетика, 1982 т. 18, с. 1276.

¹⁴ Вавилов Н. И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. Саратов, 1922.

НАДЕЖНОСТЬ ГЕНОМА И ПРОГРЕССИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Таким образом, анализ результатов радиобиологических экспериментов позволяет сформулировать следующую точку зрения на возможную роль повышения надежности генома в прогрессивной биологической эволюции.

По мере накопления в клетках ДНК все большую селективную ценность приобретает надежность генетического аппарата. Задача повышения надежности генома могла иметь разные решения; одни из них оказывались тупиковыми, так как препятствовали его дальнейшему совершенствованию, а другие открывали новые пути для прогрессивной эволюции. Примерами первых могут служить многоядерность и полигеномность у некоторых простейших, примером вторых — диплоид-специфическая репарация.

Диплоид-специфическая репарация стала возможной, скорее всего, у гаплоидных предков современных эукариот-диплоидов в результате удачного сочетания функций нескольких ферментов, первоначально выполнявших другие функции; судя по множественному эффекту мутаций генов, контролирующих синтез репарационных ферментов, эти функции выполняются ими до сих пор. Переход к вегетативной диплофазе, реализовавшей эту возможность, был, таким образом, «непредвидимым» следствием совместной деятельности этих ферментов. Диплоидное состояние генома не только открыло пути для

дальнейшего увеличения содержания в них ДНК, но и «создало» весьма эффективный механизм осуществления этого процесса — каскадный мутагенез, а также послужило основой для морфофункциональной дифференциации гамет. В последующем все это привело к возникновению оогамии и высших многоклеточных растений и животных.

Конечно, я далек от мысли, что это — единственный механизм прогрессивной эволюции генома. Другие механизмы, ему сопутствующие и, может быть, не менее эффективные, еще предстоит установить. Но одна особенность рассмотренного выше механизма, которую я уже отмечал, должна быть присуща им всем. Это — выявление в новых ситуациях новых свойств и функций у тех черт строения живых организмов, которые первоначально создавались естественным отбором в качестве одного из возможных решений совершенно других, злободневных, задач. Здесь явная аналогия с феноменом, который античные математики называли поризмом: когда метод решения какой-либо частной математической задачи оказывался значительно важнее для дальнейшего развития науки, чем та задача, которую с его помощью удалось решить¹⁵. Думаю, это сходство биологической эволюции и развития человеческого знания отражает наиболее общие закономерности динамики информации, лежащей в их основе.

¹⁵ Грязнов Б. С. О взаимоотношении проблем и теорий. — Природа, 1977, № 4, с. 60.

К ЧИТАТЕЛЯМ «ПРИРОДЫ»

Подписка на журнал «Природа» не ограничена и принимается во всех отделениях связи на любой срок с любого месяца.

Цена одного номера — 80 к.

Подписная цена:

на квартал — 2 р. 40 к.,

на полугодие — 4 р. 80 к.

Индекс 70707.

Обо всех случаях отказа в подписке просим сообщать в редакцию журнала по адресу: 117049, ГСП-1, Москва, Мароновский пер., 26.

Лазерная спектроскопия одиночных атомов и молекул

В. С. Летохов



Владимир Степанович Летохов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института спектроскопии АН СССР, заведующий лабораторией лазерной спектроскопии этого института. Автор работ по генерации и усилению мощных коротких и ультракоротких лазерных импульсов, принципам лазерных стандартов частоты, методам нелинейной лазерной спектроскопии, селективной лазерной фотохимии, и лазерного разделения изотопов. Лауреат Ленинской премии. Почетный член Американского оптического общества. Опубликовал ряд монографий, неоднократно печатался в «Природе».

Одна из основных задач спектроскопии — получить максимально полную и точную информацию о веществе при минимальном количестве его, имеющемся в распоряжении исследователя. Теоретический предел чувствительности детектирования — один атом или одна молекула, и этого вполне достаточно, так как одна частица содержит всю информацию о своем строении. Однако в реальном физическом эксперименте до сих пор можно было измерять спектры, только располагая достаточно большим числом частиц в образце (примерно от 10^{10} до 10^{20} для различных методов и объектов). Поэтому проблема повышения чувствительности оставалась крайне важной на протяжении всего столетнего периода развития оптической спектроскопии.

В то же время в ядерной физике давно известны эксперименты с детектированием одиночных ядер. Достаточно вспомнить визуальный сцинтиллятор-счетчик, с помощью которого Резерфорд наблюдал вспышки от отдельных α -частиц на экране. Затем появились счетчик Гейгера, камера Вильсона и другие трековые камеры и счетчики, позволяющие детектировать одиночные ядра и элементарные частицы, определять их тип и измерять их энергию.

В чем причина такого большого раз-

личия методов детектирования в атомно-молекулярной и в ядерной физике? Оно, очевидно, связано с тем, что в ядерной физике экспериментаторы имеют дело, во-первых, с заряженными частицами и, во-вторых, с частицами, обладающими большой кинетической энергией. Такие частицы, как правило, довольно эффективно взаимодействуют с макроскопическим детектором. В оптике же мы чаще всего имеем дело с нейтральными атомами и молекулами, которые находятся в основном или низколежащих квантовых состояниях, энергия которых составляет десятки доли электронвольта. Такие частицы при взаимодействии с макродетектором вызывают очень малое воздействие на него, не уловимое на фоне флуктуаций.

МОЖНО ЛИ ПО СПЕКТРАМ ДЕТЕКТИРОВАТЬ ОДИНОЧНЫЕ АТОМЫ?

Естественно возникает вопрос: можно ли достигнуть чувствительности, достаточной для экспериментов с одиночными нейтральными частицами, и как это сделать? Из опыта экспериментальной ядерной физики сразу следуют два вывода.

Во-первых, надо попытаться превратить нейтральную частицу в заряженную, так как управлять кинетической энергией нейтральной частицы крайне трудно.

В этом случае для детектирования образующихся заряженных частиц можно использовать методы ядерной физики. Во-вторых, надо попытаться увеличить внутреннюю энергию частицы.

Этот путь — возбуждение внутренних степеней свободы — давно и успешно использовался в экспериментах с атомными и молекулярными пучками, например в знаменитом эксперименте Лэмба и Ризерфорда, в котором был обнаружен лэмбовский сдвиг уровней атома водорода¹.

В этом эксперименте пучок атомов водорода возбуждался при столкновениях с электронами и некоторые атомы попадали в метастабильное $2S_{1/2}$ -состояние. Одноквантовые переходы в основное состояние для таких метастабильных атомов запрещены, и возбужденный атом водорода в метастабильном состоянии с энергией около 10 эВ может легко достигать детектора. Регистрация производится поверхностно-ионизационным детектором, при взаимодействии с которым возбужденный атом ионизуется. Изменяя заселенность метастабильного состояния с помощью СВЧ-поля на частоте Ω , соответствующей переходу $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2}$, можно было заставлять высвечивать метастабильные атомы водорода и, следовательно, изменять ионный ток. В этом эксперименте использовалась высокая чувствительность ионизационного детектирования возбужденных атомов для регистрации очень слабой линии поглощения в СВЧ-диапазоне. Конечно, случай с атомом водорода является уникальным, поскольку детектируются долгоживущие метастабильные атомы с заметной внутренней энергией. Поэтому такой исключительно чувствительный метод нельзя использовать для регулярных измерений на произвольных квантовых переходах атомов.

Естественно попытаться использовать возбуждение атомов с тем, чтобы уже затем ионизационным методом детектировать возбужденные атомы. С точки зрения избирательного возбуждения лучше всего использовать для этой цели оптическое излучение. Чтобы получить высокую вероятность возбуждения атома, необходимо иметь излучение с достаточно высокой спектральной яркостью на нужной длине волны, т. е. требуется именно лазер.

Для регистрации поглощения света атомом в принципе можно использовать

три возможности²: 1) изменять энергию возбуждающего лазерного луча (метод поглощения); 2) изменять направление лазерного луча и его частоту (метод флуоресценции); 3) изменять состояние, в частности энергию, атома. Рассмотрим предельные возможности каждого метода.

Итак, во-первых, можно попытаться обнаружить атом, регистрируя ослабление интенсивности лазерного излучения за счет поглощения фотона атомом. В оптимальных условиях один атом может поглотить один фотон за время порядка 10^{-7} — 10^{-8} с. Чтобы реализовать такую скорость поглощения, нужно иметь достаточно высокую интенсивность излучения светового луча, в котором, однако, неизбежно присутствуют квантовые флуктуации числа фотонов. Средняя величина таких флуктуаций заметно превосходит величину одного поглощенного фотона. Поэтому методом поглощения нельзя обнаруживать одиночные атомы даже с помощью лазера.

Другой возможным методом — метод флуоресценции, когда поглощение детектируется по последующему спонтанному излучению возбужденного атома. В этом случае сам лазерный луч, квантовые флуктуации которого ограничивают чувствительность метода поглощения, на фотодетектор не попадает, поэтому можно рассчитывать на повышение чувствительности. Это действительно так. За время длительного наблюдения (10^{-3} — 10^{-5} с) можно добиться многократного поглощения и переизлучения фотонов одним и тем же атомом. В пределе достаточно быстрого возбуждения можно осуществить сотни и тысячи циклов переизлучений. Даже с учетом реальной эффективности сбора фотонов, переизлученных в 4π стерадиан, и конечной квантовой эффективности фотодетектора можно добиться заметного числа фотоэлектронов, создаваемых одним атомом за время наблюдения. В этом случае можно уверенно детектировать одиночные атомы, так как сигнал от многих фото-

² Более подробное обсуждение проблем и методов лазерной спектроскопии см. в обзоре: Летохов В. С. — Усп. физ. наук, 1976, т. 118, с. 199. Ввиду популярного характера журнала «Природа» мы не будем каждый раз ссылаться на оригинальные публикации того или иного эксперимента или предложения. Желющие ознакомиться с этой стороной вопроса могут обратиться к данному обзору, а также к обзорам, указанным в сносках 3 и 4, где приведены подробные списки литературы.

¹ Lamb W. E., Jr., Retherford R. C. — Phys. Rev., 1947, v. 70, p. 241.

электронов существенно превышает уровень шума фотодетекторов. Такие эксперименты по лазерному флуоресцентному детектированию одиночных атомов были выполнены в СССР — в Институте спектроскопии АН СССР — и в США в 1977 г. К сожалению, далеко не для всех многоуровневых атомов можно реализовать такую циклическую схему и тем более это очень трудно сделать для молекул из-за богатой колебательно-вращательной структуры электронных уровней. Поэтому метод флуоресценции не является универсальным

и не решает проблему детектирования одиночных атомов и молекул.

Остается третий путь — непосредственное детектирование возбужденных атомов. Наиболее простой и естественный способ быстрой и эффективной регистрации возбужденных атомов на фоне невозбужденных — их ионизация дополнительным лазерным импульсом с энергией фотонов, которая достаточна, чтобы ионизовать возбужденные атомы, но мала для ионизации невозбужденных атомов. Если интенсивности возбуждающего и ионизирующего лазерных импульсов высоки, то такую двухступенчатую селективную фотоионизацию можно осуществить за 10^{-7} – 10^{-9} с со 100 %-ной вероятностью. Образующийся «фотоион» регистрируется простыми методами также со 100 %-ной эффективностью.

Описанная схема двухступенчатой фотоионизации является простейшей. Для атомов с высоким потенциалом ионизации часто применяется трехступенчатая схема фотоионизации с помощью импульсов трех лазеров с перестраиваемой частотой. Для повышения вероятности ионизации можно настраивать частоту второго лазерного импульса на частоту перехода в автоионизационное состояние. Наконец, высоковозбужденные атомы могут быть ионизованы инфракрасным лазерным импульсом или импульсом электрического поля. Все эти схемы уже успешно использованы в лазерной фотоионизационной спектроскопии.

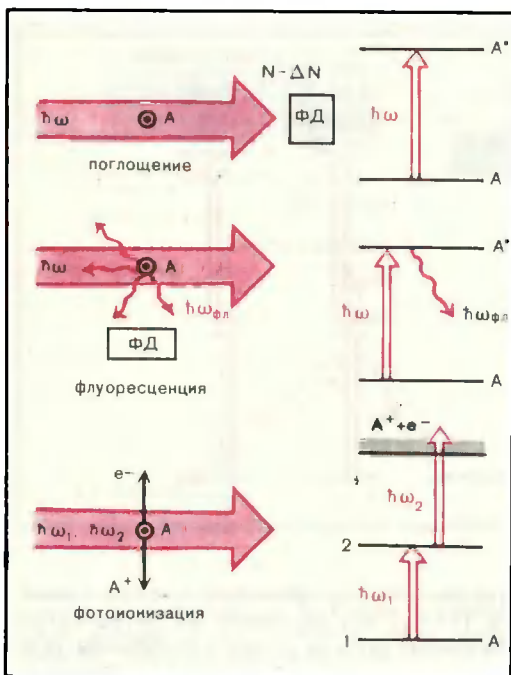
Особенностью фотоионизационного метода является универсальность, так как он не требует специальной схемы уровней, типа и скорости их распада, он применим в принципе к любому атому или любой молекуле.

ИСТОРИЯ МЕТОДА

Метод двухступенчатой резонансной фотоионизации атома был предложен для целей разделения изотопных атомов и детектирования «следов» элементов в 1969–1970 гг.³

Первый эксперимент по резонансной ступенчатой ионизации атомов был проведен в Институте спектроскопии еще в 1971 г. на примере атома рубидия. В этом эксперименте мы использовали прямой

³ См. обзор по лазерным методам детектирования одиночных атомов: Балыкин В. И., Беков Г. И., Летохов В. С., Мишин В. И. — Усп. физ. наук, 1980, т. 132, с. 293.

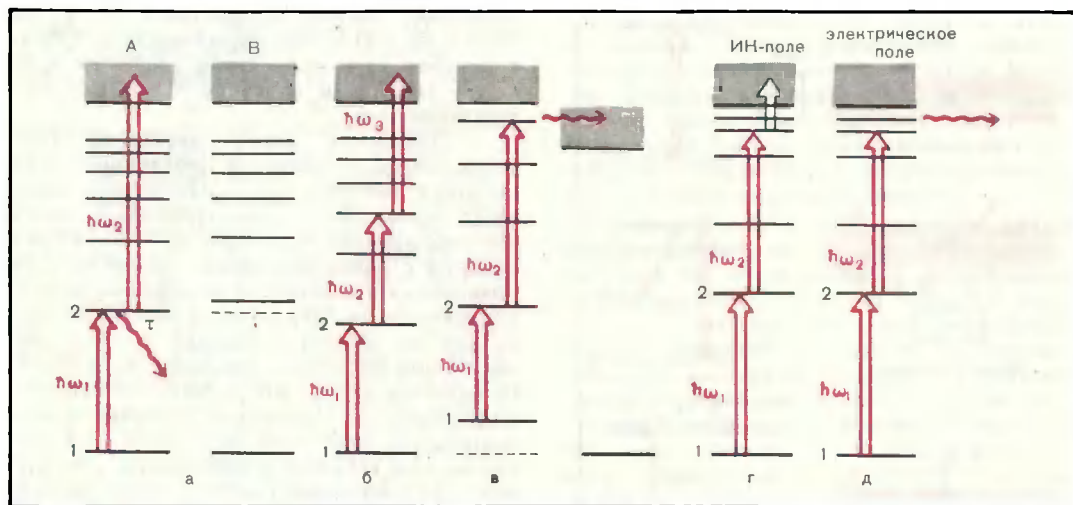


Основные методы спектрального обнаружения атомов или молекул. Во всех случаях атомы A (или молекулы) освещаются излучением на частоте поглощения ω , в результате которого атом A переходит в возбужденное состояние A^* . В методе поглощения (вверху) фотодетектор ФД регистрирует уменьшение числа фотонов N в световом луче за счет резонансного поглощения атомами некоторого числа фотонов. Во флуоресцентном методе (в середине) фотодетектор ФД регистрирует флуоресцентные фотоны на частоте $\omega_{фл}$ перемещаемые возбужденными атомами. Наконец, в фотоионизационном методе (внизу) последовательное поглощение атомом двух (или нескольких) резонансных фотонов из двух (или много) частотного лазерного луча приводит к фотоионизации атома и появлению пары заряженных частиц: фотоиона A^+ и фотозлектрона e^- , которые легко регистрируются, например, вторичным электронным умножителем.

переход из возбужденного состояния в континуум состояний. Вероятность такого перехода довольно мала, и поэтому эффективность двухступенчатой фотоионизации составляла всего 0,1 %. В 1975 г., увеличив плотность энергии второго импульса до долей Дж/см², нам удалось достигнуть 100 %-ной эффективности превращения атома рубидия в фотоион. Наконец, ведя поиск наиболее эффективных схем резонансной ионизации при умеренных требованиях к энергетике лазеров, мы предложили осуществлять многоступенчатое воз-

буждение высоколежащего (ридберговского) состояния атома и затем ионизацию его электрическим полем. Первые успешные эксперименты по многоступенчатой ионизации атомов натрия через ридберговские состояния были осуществлены также в 1975 г. — в Институте спектроскопии и одновременно в США.

Вообще говоря, в США работы в области резонансной фотоионизации начались на несколько лет позже, чем у нас. Так, в 1975 г. в Оксиджской лаборатории был проведен эксперимент по фото-



Различные схемы многоступенчатой фотоионизации атома: а) двухступенчатая фотоионизация при последовательном поглощении двух фотонов за время, которое короче времени распада τ возбужденного уровня. Такой процесс является избирательным, так как частоты резонансного поглощения ω_1 двух разных атомов А и В никогда не совпадают; б) еще более избирательная трехступенчатая фотоионизация при последовательном поглощении трех фотонов, когда уже две первые ступени поглощения фотонов $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ являются высокоизбирательными; в) двухступенчатое резонансное возбуждение так называемого автоионизационного состояния атома, которое связано с континуумом; г) трехступенчатое возбуждение с использованием инфракрасного лазерного излучения на последней ступени, которое ионизует высоковозбужденное состояние, лежащее вблизи границы ионизации; д) двухступенчатое возбуждение высоковозбужденного (ридберговского) состояния атома, который легко ионизируется действием импульса электрического поля, так как электрон в высоковозбужденном состоянии слабо связан и легко отрывается от атома.

ионизации метастабильных атомов гелия, а в 1977 г. осуществлено детектирование одиночных атомов цезия в буферном газе пропорционального счетчика по лавинному сигналу, возникающему при двухступенчатой резонансной фотоионизации его атома. В нашем институте в 1977 г. были проведены успешные эксперименты по детектированию свободных одиночных атомов натрия в атомном пучке.

Важность применения метода для детектирования молекул, особенно в сочетании с масс-спектрометрией образующихся фотоионов, теоретически была нами обоснована еще в 1972 г. Первые эксперименты по двухступенчатой фотоионизации молекул в газе (H_2CO) и пучке масс-спектрометра были выполнены в 1978 г., а по детектированию этим методом одиночных молекул (нафталина) — в 1981 г.

Следует добавить, что еще в 1975 г. была рассмотрена возможность использования метода многоступенчатой фотоионизации.

зации для пространственной локализации молекулярных связей в большой молекуле, адсорбированной на поверхности иглы ионного проектора. Первые эксперименты по наблюдению молекулярных фотоионов при облучении поверхности были проведены в Институте спектроскопии в 1980 г. Хотя идея лазерного фотоионного проектора (микроскопа) с ангстремным разрешением еще далека от реализации, на пути к этой цели недавно мы разработали метод детектирования одиночных молекул, адсорбированных на поверхности, так что одна де-

тектируемая молекула приходится на 10^8 — 10^{10} молекул другого вещества в мономолекулярном слое⁴.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА

Чувствительность метода, как отмечено выше, вполне позволяет детектировать одиночные атомы или молекулы. За один акт облучения можно обнаружить атом или молекулу данного типа и определить ее исходное квантовое состояние. Для атомов фотоионизационное детектирование с та-

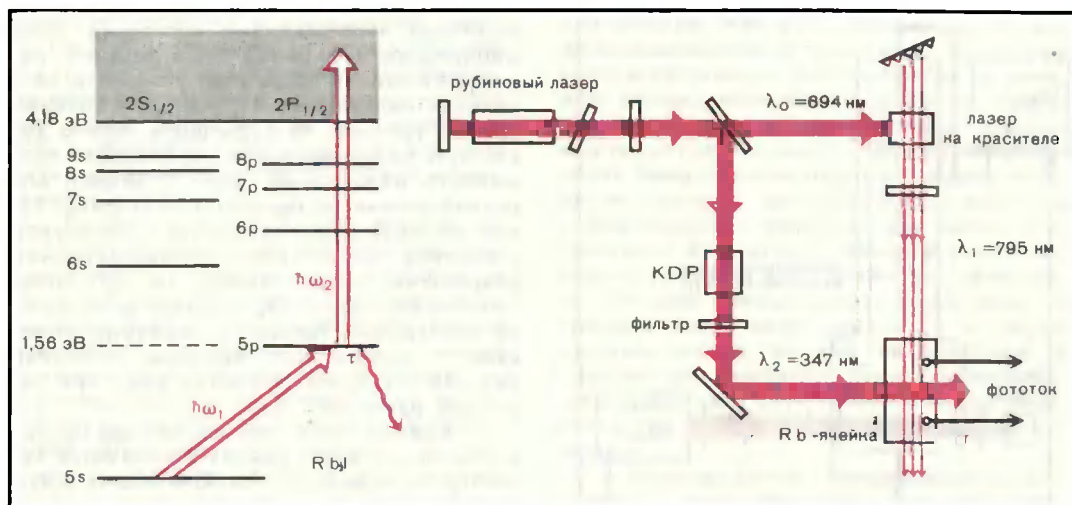


Схема первого эксперимента по резонансной двухступенчатой фотоионизации лазерным излучением атома рубидия. Слева показана схема использованных квантовых переходов атома, справа — схема установки. Лазер на кристалле рубине излучал короткий импульс красного света на длине волны $\lambda_0 = 694$ нм, накачивающий перестраиваемый лазер на красителе. Таким образом получался первый лазерный импульс на длине волны $\lambda_1 = 795$ нм для резонансного возбуждения атома Rb. Одновременно часть импульса рубинового лазера умножалась по частоте в нелинейном кристалле KDP, и таким методом формировался второй лазерный импульс, ультрафиолетовый, на длине волны $\lambda_2 = 347$ нм, который был способен фотоионизировать атом рубидия из возбужденного состояния. Оба лазерных импульса на длинах волн λ_1 и λ_2 совмещались вместе в кювете с парами Rb низкого давления, где во время облучения образовывались заряженные пары Rb^+ и e^- , т. е. наблюдался импульс фототока.

кой чувствительностью сегодня является обычным делом. Здесь нет никаких принципиальных трудностей, нужно только обеспечить резонанс атома с лазерными импульсами на каждой из ступеней. В этом случае достигается превращение резонансного атома в ион с 50—100 %-ной эффективностью. Высокая чувствительность фотоионизационного метода позволяет отчетливо наблюдать флуктуации числа атомов в области наблюдения, т. е. наблюдать непосредственно корпускулярную, атомистическую структуру вещества.

Спектральное разрешение фотоионизационного метода определяется шириной линии многоступенчатого возбуждения атома или молекулы, которая, в свою оче-

⁴ См. обзор по фотоионизационному детектированию молекул: Антонов В. С., Летохов В. С., Шибанов А. Н. — Усп. физ. наук, 1984, т. 142, с. 177.

редь, зависит от ширины линий на каждой ступени возбуждения (точнее, определяется наименьшей из них). Существующий арсенал методов лазерной спектроскопии позволяет устранить доплеровское уширение линий, и тогда спектральное разрешение метода определяется однородной шириной⁵.

Как уже говорилось, метод позволяет определить не только наличие данной частицы, но и ее квантовое состояние, в том числе и промежуточные состояния, существующие очень короткое время (или корот-

коживущие радиоактивные изотопы). В этом смысле можно говорить о временном разрешении метода.

Регистрация частицы происходит за один акт облучения, длительность которого в оптимальном случае короче времени жизни каждого из возбужденных промежуточных состояний. Для атомов это обычно составляет десятки наносекунд, а для молекул, особенно в растворах, сокращается до пикосекунд. Поэтому при использовании для возбуждения и ионизации лазерных импульсов соответствующей длительности можно достигнуть временного разрешения порядка времени жизни промежуточных возбужденных состояний. Если однородное уширение спектральной линии поглощения превышает уширение, связанное с релаксацией заселенности возбужденных уровней, то в принципе можно достигнуть более высокого предельного временного разрешения, определяемого обратной величиной однородной ширины. Таким методом в экспериментах с молекулой стильбена достигнуто субпикосекундное разрешение. Существенно, что при этом с помощью пикосекундных импульсов можно исследовать процессы перехода молекулы в разные возбужденные состояния без участия других молекул даже при заметных давлениях газа.

Важной особенностью метода многоступенчатого возбуждения и ионизации является возможность исключительно высокой селективности обнаружения частиц с близкими характеристиками. В обычной спектроскопии мы привыкли к ограничению селективности из-за перекрытия крыльев близких спектральных линий атомов или молекул. По этой причине принципиально невозможно, например, оптически обнаружить атом радиоуглерода ^{14}C на фоне обычных атомов углерода ^{12}C , так как отношение их концентраций в природе 10^{-12} — 10^{-16} . Несмотря на отчетливый изотопический сдвиг их спектральных линий (особенно заметный в колебательно-вращательном спектре молекулы CO), ничтожное перекрытие крыльев линий ограничивает минимальную концентрацию ^{14}C , обнаружимую на фоне спектра ^{12}C , и этот минимум, к сожалению, выше, чем природная концентрация радиоуглерода. Иное дело в методе многоступенчатого возбуждения, где имеется возможность многократного изотопически-селективного возбуждения на каждой ступени. Такая многократная селекция возбуждаемой частицы напоминает многократную монохроматизацию спектра в двойных и тройных

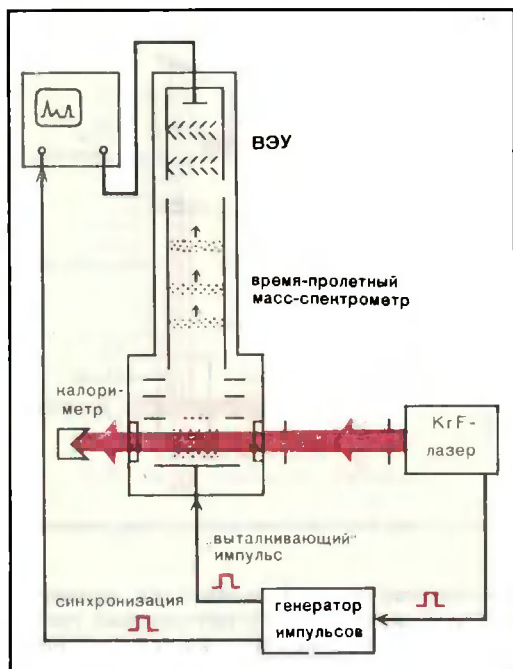


Схема эксперимента, в котором методом селективной двухступенчатой фотоионизации детектировалось несколько молекул нафталина. Импульс ультрафиолетового излучения лазера на смеси криптона и фтора, излучающего на длине волны 248 нм, облучал область во времяпролетном масс-спектрометре, в которой в «следовых» количествах содержались молекулы нафталина в разреженном воздухе. После облучения появились фотоны и заряженные фрагменты молекулы нафталина, которые под действием «выталкивающего» импульса электрического поля двигались во времяпролетном промежутке и достигали вторичноэлектронного умножителя (ВЭУ). Спектр масс образующихся ионов и фрагментов определялся по времени пролета до ВЭУ.

⁵ Подробнее об однородной и неоднородной ширине спектральных линий, доплеровском уширении и т. п. см.: Летохов В. С., Чеботов В. П. Нелинейные узкие резонансы в оптике и их применение. — Природа, 1978, № 3, с. 78.

Предельные характеристики лазерной резонансной фотоионизационной спектроскопии

Характеристики	Теоретический предел
Чувствительность	Одиночный атом или молекула
Спектральное разрешение	10^6 — 10^{13} Гц
Временное разрешение	10^{-6} — 10^{-13} с
Селективность	10^{13} — 10^{20}
Универсальность	Любой атом или молекула

монохроматорах, но, в отличие от них, осуществляется на разных линиях λ_1 , λ_2 , λ_3 спектра поглощения возбуждаемой частицы. При этом происходит перемножение селективностей возбуждения, например, при трехступенчатом возбуждении изотопного атома: $S=S_1S_2S_3$ (где S_i — селективность возбуждения на i -й ступени), что позволяет достигнуть значений полной селективности $S \geq 10^{17}$ — 10^{20} .

Особенно существенную роль высокая селективность играет, естественно, при обнаружении радиоактивных изотопов, в том числе короткоживущих, которые присутствуют в веществе часто в ничтожных количествах. Указанные цифры означают возможность спектрального обнаружения, например, одного радиоактивного атома в 10^{-3} — 1 граммах вещества. Так как такой способ обнаружения не связан с радиоактивным распадом ядра, то он с одинаковым успехом применим и к долгоживущим изотопам с временем распада 1 — 10^6 лет, которые принципиально не обнаружимы методами ядерной физики в указанных концентрациях и количествах вещества.

Таким образом, фотоионизационный метод спектроскопии по чувствительности приблизился к методам регистрации частиц в ядерной физике, но существенно превышает их по селективности детектирования. На первый взгляд кажется, что перемножение селективностей возможно только для некоторых атомов, имеющих заметные изотопические сдвиги возбужденных уровней. Эту трудность можно обойти, применяя ускорение атомов (в виде их ионов), когда изотопы с различными массами приобретают различную скорость, а значит, и различный доплеровский сдвиг всех спектральных линий — способ, предложенный нами в 1982 г.

Наконец, большим преимуществом фотоионизационного метода является его универсальность, так как он принципиально применим к любому атому или мо-

лекуле. Метод также нечувствителен к тому, что происходит с возбужденной частицей дальше. Как уже говорилось, атомы фотоионизационным методом обнаруживаются достаточно просто, особенно сложные атомы, имеющие множество спектральных линий в области, хорошо освоенной перестраиваемыми лазерами на красителях. Некоторые экспериментальные трудности имеются для водорода, галогенов и благородных газов, так как линии возбуждения этих атомов лежат в плохо освоенной области вакуумного ультрафиолета. Однако применение метода двух- и трехфотонного возбуждения (т. е. через промежуточные, но уже не реальные, а виртуальные состояния) принципиально решает проблему, хотя эффективность ионизации при этом, естественно, заметно снижается.

Определенные сложности возникают также при фотоионизационном детектировании некоторых молекул как из-за отсутствия подходящих линий возбуждения в видимой и ультрафиолетовой области, так и из-за конкуренции процесса фотоионизации с фрагментацией молекул на нейтральные продукты. Тем не менее, как уже говорилось, нам удалось методом фотоионизации в сочетании с масс-спектрометрией детектировать несколько молекул нафталина. Комбинация метода селективной фотоионизации с масс-спектрометрией представляется особенно универсальной для детектирования «следов» сложных молекул. Такой метод обнаружения молекул может привести к созданию лазерного детектора «запаха», так как его чувствительность и избирательность может быть такой же, как и у органов обоняния животных и человека. По мнению П. Л. Капицы «догнать обоняние собаки» есть одна из проблем физики будущего⁶. Фотоиони-

⁶ Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М., 1981, с. 397.

зационная оптико-масс-спектрометрия, вероятно, сможет решить эту проблему.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Уникальные характеристики фотоионизационной спектроскопии атомов и молекул, естественно, открывают исключительно широкое поле приложений метода: от ядерной физики до медицины. В Институте спектроскопии совместно с другими заинтересованными институтами ведется ряд исследований по применению метода в различных задачах.

Очевидной областью применения фотоионизационной спектроскопии одиночных атомов является ядерная физика и астрофизика, где необходимо детектировать одиночные ядра и изотопы. По существу речь идет о создании нового направления экспериментальной физики, объединяющего возможности лазерных и ядерных методов.

Высокое разрешение фотоионизационного метода в сочетании с предельно возможной чувствительностью особенно ценно для исследования сверхтонкой и изотопической структуры спектральных линий короткоживущих ядер, доступных для измерения в малом количестве (10^3 — 10^{10} атомов). Этот метод успешно используется для измерения радиусов ядер короткоживущих изотопов, получаемых на протонном ускорителе в Ленинградском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР. Нами совместно разработан специальный лазерно-ядерный измерительный комплекс, в котором для детектирования радиоактивных ядер в режимах «on-line» и «off-line»⁷ используется метод трехступенчатой фотоионизации атомов. Особенностью установки является применение для фотоионизации специально разработанных лазеров на красителях с высокой частотой повторения импульсов (10 кГц) с накачкой излучением импульсно-периодических лазеров на парах меди. Столь высокая для лазеров частота позволяет увеличить долю «перехваченных» редких атомов, пролетающих область лазерного облучения. При разрешении около 300 МГц чувствительность фотоионизационного метода является рекордной, так как позволяет измерять спектры изотопов, генери-

руемых в мишени в количестве всего 3000 ядер в секунду. Это в 100—1000 раз выше чувствительности установки ИЗОЛДЕ (ISOtope on Line DEtection) в ЦЕРНе, использующей упомянутый в начале статьи флуоресцентный метод.

Другие области применения метода в ядерной физике — детектирование редких изотопов космического происхождения и лазерно-радиохимическое детектирование нейтринно малых энергий — находятся в стадии разработки.

Потенциально очень важная для практики область применений метода — анализ «следов» атомов и молекул. Исключительно высокие аналитические возможности фотоионизационного метода уже успешно продемонстрированы в Институте спектроскопии в экспериментах, проведенных совместно с Институтом химии АН СССР (Горький), Институтом океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР и Центральным научно-исследовательским геолого-разведочным институтом Министерства геологии СССР (ЦНИГРИ). С точки зрения аналитических применений, фотоионизационный метод анализа «следов» элементов имеет наряду с предельной чувствительностью и универсальностью ряд других очень важных преимуществ:

возможность работы с натуральными образцами вещества без предварительной химической обработки;

испарение в вакууме и, следовательно, отсутствие дополнительных неконтролируемых примесей;

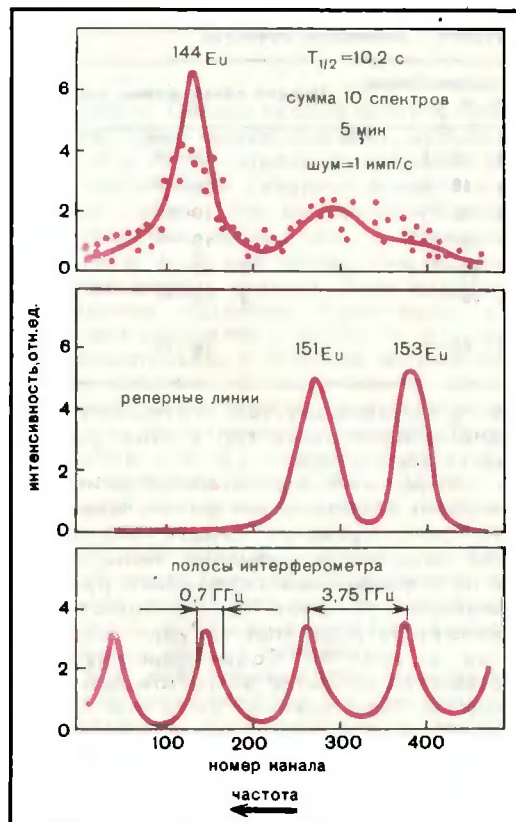
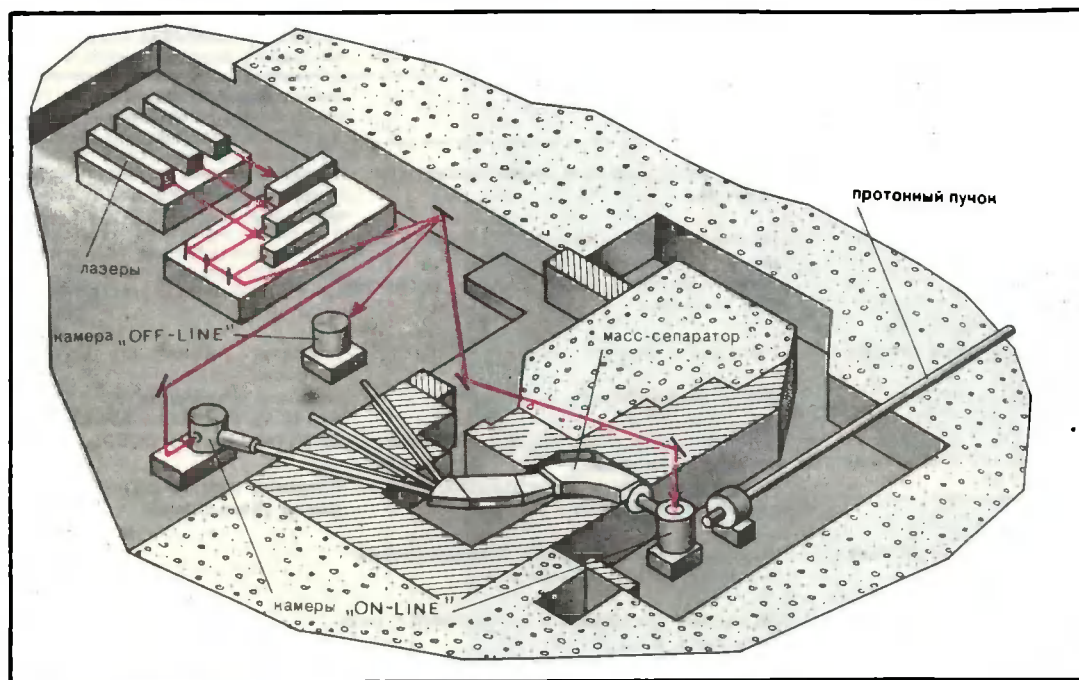
возможность раздельной регистрации поверхностной и объемной примесей за счет последовательного испарения различных слоев вещества.

В качестве примеров можно привести следующие случаи анализа, трудные для всех существующих методов, но успешно проведенные методом многоступенчатой фотоионизации: анализ следов алюминия в морской воде без применения ее фракционирования и концентрирования и первое определение содержания рутения в морской воде⁸.

В настоящее время не существует прямого метода и даже общепринятой методики определения растворенного алюминия в природных водах. Поэтому надежные данные о растворенном алюминии в морских и океанских водах отсутствуют,

⁷ Т. е. непосредственно в пучке ускорителя, в процессе облучения, и в лабораторных условиях, в образце после накопления изотопа при облучении его в ускорителе.

⁸ Bekov G. I., Yegorov A. S., Letokhov V. S., Radayev V. N. — Nature, 1983, v. 301, p. 410.



Общий вид лазерно-ядерного комплекса Института спектроскопии и Ленинградского института ядерной физики, расположенного на протонном ускорителе в Гатчине. Протонный пучок облучает мишень, в которой за счет ядерных реакций образуются короткоживущие изотопы. Они испаряются из нагретой мишени и разделяются в масс-сепараторе. В режиме «off-line» исследуемый изотоп накапливается в образце и затем поступает в камеру, в которой нагревается и выходит наружу, в вакуум в виде нейтральных атомов с радиоактивным ядром, где и облучается лазерным пучком. Для исследования короткоживущих изотопов и ядерных изомеров с временем жизни менее 10 с используется режим работы «on-line», когда поток радиоактивных ядер непрерывно накапливается в образце и испаряется из него в виде нейтральных атомов. В этом случае из-за высокой концентрации образующихся атомов с короткоживущим ядром необходима максимально высокая чувствительность детектирования в сочетании с высоким спектральным разрешением. Резонансная фотоионизация атомов происходит по трехступенчатой схеме при одновременном действии трех лазерных импульсов от трех лазеров на красителях с перестраиваемой частотой.

Пример спектральной информации о сверхтонкой и изотопической структуре радиоактивных атомов, получаемой на лазерно-ядерном комплексе ЛИЯФ—ИСАН в Гатчине. Вверху показан спектр одной из атомных линий изотопа европия с временем полураспада ядра $T_{1/2} = 10,2$ с. В середине для сравнения приведен реперный спектр той же линии для двух других изотопов европия. Внизу дана картина пропускания интерферометра при сканировании частоты лазера (частота соответствует номеру канала). По этой картине определяются частотные интервалы и спектральное разрешение.

Разрабатываемые в Институте спектроскопии применения фотоионизационной лазерной спектроскопии

Область	Задача	Партнеры Института спектроскопии
Ядерная физика	Измерение радиусов короткоживущих изотопов	Ленинградский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР (Гатчина)
Астрофизика	Лазерно-радиохимический детектор нейтрино Детектирование очень редких космогенных изотопов	
Анализ следов атомов	Примеси в сверхчистых материалах	Институт химии АН СССР (Горький)
	Микроэлементы в морской воде	Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР
	Поиски месторождений редких благородных элементов Микроэлементы в биообъектах, медицинская диагностика	ЦНИГРИ Мингео СССР Финский научно-технический центр (Хельсинки)
Анализ следов молекул	Фотоионизационная масс-спектрометрия Лазерный детектор «запаха»	
Структурный анализ биомолекул	Лазерный фотоионный микроскоп с разрешением 2—3 Å	

Лазерный фотоионизационный спектральный анализ рутения в океанских объектах

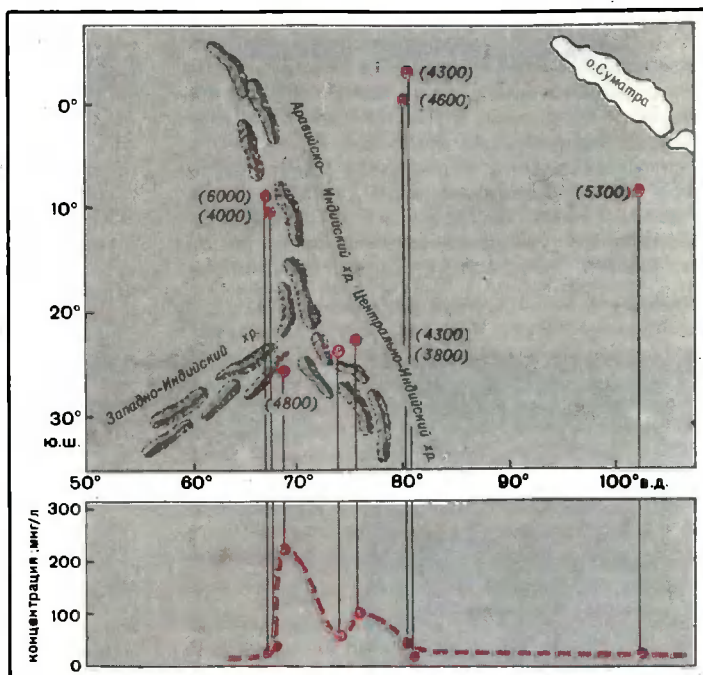
Анализируемый объект	Измеренная концентрация, вес. %	Предел обнаружения, вес. %
Железо-марганцевая конкреция	(1—20) · 10 ⁻⁷	10—10
Донный осадок	(1—5) · 10 ⁻⁸	10—10
Костные ткани рыб	(7—30) · 10 ⁻⁹	10—10
Подводные растения	5 · 10 ⁻¹⁰	10—10
Иловая вода (Индийский океан)	(7—15) · 10 ⁻¹⁰	3 · 10 ⁻¹²
Морская вода (Антарктида)	3 · 10 ⁻¹⁰	3 · 10 ⁻¹²
Аэрозоль (Северная Атлантика на широте Сахары)	9,1 · 10 ⁻⁸	10—10

а для иловых вод имеются только единичные данные. Нами совместно с Институтом океанологии были проведены измерения содержания алюминия в пробах воды в различных районах Мирового океана, и в частности в иловых водах Индийского океана. Иловая вода была отжата из монолитов осадков (10—15 см от дна), поднятых дночерпателем, и отфильтрована через 0,45-микронные мембранные фильтры. Характерно заметное повышение содержания растворенного алюминия в районах подводных хребтов, обусловленное образованием здесь металлоносных осадков. Такое повышение особенно сильно проявляется в области «тройной точки», где пересекаются три подводных хребта. Это объяс-

няется, по-видимому, тем, что процесс подводного образования гор в этом районе еще не завершился.

Убедительное доказательство исключительных возможностей фотоионизационного детектирования следов элементов было получено в успешных экспериментах по определению содержания рутения в океанских объектах, проводившихся совместно институтами спектроскопии, океанологии и ЦНИГРИ. Содержание рутения в океанских объектах до настоящего времени не было изучено из-за его малой распространенности и отсутствия достаточно чувствительных методов его определения. Анализ показал явно повышенное содержание рутения в железо-марганцевых

Пример результатов исследования содержания алюминия, растворенного в иловых (поровых) водах Индийского океана, проведенных институтами спектроскопии и океанологии методом фотоионизационного детектирования атомов. Вверху показан исследованный район Индийского океана, точки, где брались пробы, и их глубина (в скобках). Внизу — изменения концентрации Al при движении с запада на восток, т. е. при пересечении хребтов. Отчетливо видно увеличение концентрации Al в районе «тройной точки».



конкрециях. Однако особый интерес представляет сравнительно высокое содержание рутения в пробе аэрозоля, собранного в центральной части Северной Атлантики на широте Сахары. Эта концентрация почти в тысячу раз выше, чем в океанской воде, и в 4—5 раз выше, чем в пелагических донных осадках. Если подобное обогащение рутением характерно для океанских аэрозолей в целом, то это можно рассматривать в качестве аргумента в пользу гипотезы о космическом происхождении основной части рутения в океане, поскольку космогенные материалы (пыль, метеориты и т. д.) обогащены рутением. Такой же вывод может быть сделан из обратного соотношения между содержаниями рутения и палладия в океанской воде по сравнению с объектами литосферы. Это может быть обусловлено тем, что наиболее распространенным элементом платиновой группы в метеоритном веществе является именно рутений.

Эти два примера свидетельствуют о больших возможностях фотоионизационной лазерной спектроскопии в анализе следов элементов в реальном веществе.

Распространение метода ступенчатой фотоионизации для анализа сложных молекул,

особенно биомолекул, в сочетании с масс-спектрометрией получаемых фотоионов и известными методами сепарации молекул на входе (газовая и жидкостная хроматография и др.) при уровне чувствительности, о котором говорилось выше для молекул нафталина, должно открыть качественно новые возможности в анализе органических веществ.

В заключение я хочу выразить благодарность всем моим коллегам, которые на разных этапах помогали мне разрабатывать фотоионизационный метод лазерной спектроскопии в течение 1969—1983 гг.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Летохов В. С. НЕЛИНЕЙНЫЕ СЕЛЕКТИВНЫЕ ФОТОПРОЦЕССЫ В АТОМАХ И МОЛЕКУЛАХ. М.: Наука, 1983 (главы 3, 4, 7).

Оменетто Н. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ. Пер. с англ. под ред. Ю. Я. Кузьякова. М.: Мир, 1982.

Информатика: предмет и задачи

А. А. Дородницын



Анатолий Алексеевич Дородницын, академик, директор Вычислительного центра АН СССР. Специалист в области динамической метеорологии, аэродинамики и прикладной математики. Лауреат Ленинской премии (1984) и Государственных премий СССР (1946, 1947, 1951). Герой Социалистического Труда.

Термин «информатика» был введен французами лет пятнадцать тому назад. Он очень быстро нашел признание, и только американцы, англичане и ...мы не желали его принять. «Англоязычники» избегали применения этого термина потому, что еще раньше французов ввели термин «computer science», по смыслу эквивалентный французскому «informatique», мы же — из-за непонятного упрямого консерватизма по отношению к новой терминологии. И хотя устно, так сказать в быту, мы давно им пользовались, официальное признание он получил лишь совсем недавно.

Что же это за наука, или даже более — область человеческой деятельности, информатика? Чтобы лучше это понять, полезно обратиться к истории возникновения термина.

С первых же дней появления ЭВМ, или даже одновременно с началом их разработки, возник термин «кибернетика», но не в его старом амперовском смысле, как наука об управлении, а в более общем — наука о преобразовании информации. Часто говорят «наука о законах преобразования информации», но я избегаю слова «закон»,

оно слишком категорично и уже приводило к критическим ситуациям в науке (например, в физике из-за наивного представления о том, что ньютоновская математическая модель механических движений есть «закон»).

Под информацией в кибернетике понимается любая совокупность сигналов, воздействий или сведений, которые некоторая система воспринимает от окружающей среды (входная информация), или выдает в окружающую среду (выходная информация), или, наконец, хранит в себе (внутренняя, внутрисистемная информация).

Многие еще помнят то время, когда в нашем философском словаре кибернетика характеризовалась как «буржуазная лженаука», а в отдельных высказываниях давались еще более хлесткие эпитеты, вроде «идеалистического мракобесия».

Я никогда не разделял и не разделяю таких точек зрения, но нельзя не признать, что кибернетику постигла печальная участь. Создание ЭВМ — в принципе универсальных преобразователей информации — привлекло к кибернетике множество любителей «легкой наживы»: почему бы не завоевать себе репутацию ученого на безответственных спекуляциях о том, что такое кибернетика и что она сотворит с человеческим обществом. А такого рода любите-

ли имели гораздо больше времени организовывать саморекламу, чем те кибернетики, которые занимались делом: разрабатывали ЭВМ или алгоритмы и программы обработки информации в различных прикладных областях.

Поэтому кибернетика обросла паразитным слоем пустой «болталистики», и беда состояла в том, что за этим крикливым слоем не все сумели разглядеть очень важное научно-техническое открытие, создающее революцию в развитии производительных сил человеческого общества.

В 1962 г. на одном из заседаний Совета Международной федерации по обработке информации (IFIP) обсуждался проект словаря-гlossария по обработке информации. Тогда уже я предложил ввести в словник два различных понятия и соответствующие им термины: «cybernetics active» и «cybernetics talkative», или, по-русски, «кибернетика активная» и «кибернетика трепативная».

IFIP была организована в 1960 г. Характерный штрих — она не была названа «федерацией по кибернетике». По мысли организаторов такое название могло бы отпугнуть серьезных, деловых людей. Терминов же «computer science» или «informatique» еще не существовало.

Именно злокачественная опухоль пустословия, наросшая на кибернетике, привела к тому, что люди дела стали стесняться причисления их к кибернетикам, и возникла необходимость выделить из кибернетики ее здоровое научное и техническое ядро и отмежеваться от «трепативной» шелухи. Именно термин «computer science», а впоследствии «informatique» послужили этой цели.

«Computer science» у нас иногда переводят как «вычислительные науки», но это совершенно неверно в смысловом отношении. «Computer science» есть наука о преобразовании информации, в самом своем существе базирующаяся на вычислительной технике. Именно поэтому подчеркивается — computer science (а, скажем, не information science). Во французском термине «informatique» такого явного подчеркивания нет, но оно имеется в виду.

Отсюда уже следует состав информатики: это три неразрывно и существенно связанные части — технические средства, программные средства и алгоритмические средства.

Если о первых двух частях никогда не забывают (в английской литературе они получили и специальные термины: «hardware» и «software»), то алгоритмическая часть ин-

форматики остается почему-то в тени. В то же время каждому ясно, что без алгоритмов не может начаться программирование, а без алгоритмов и программ вычислительные машины становятся никому не нужной мебелью. Я агитирую американцев ввести еще термин «brainware» для алгоритмических средств, поскольку отсутствие специального термина создает, по-видимому, такой психологический эффект, что об этой важнейшей части информатики забывают.

У нас нередко жалуются на неэффективность использования вычислительной техники. Как правило, вина сваливается на недостаточность программного обеспечения. Но если проанализировать ситуацию внимательно, то обнаруживается, что причина причин кроется в отсутствии алгоритмического обеспечения. При наличии алгоритмов разработка программ — это уже вопрос времени, но без алгоритмов сдвинуться с места вообще нельзя.

Однако в определении этой третьей части информатики имеется своя трудность. Алгоритм — понятие весьма многоуровневое.

Правило умножения многозначных чисел — тоже алгоритм. Правило решения квадратных уравнений — алгоритм. Они были уже у аль-Хорезми. Метод решения задачи о распределении тепла в стержне — алгоритм, методы решений дифференциальных уравнений — алгоритмы, метод расчета крыла самолета на прочность — алгоритм и метод взаимодействия систем алгоритмов в решении задачи автоматизации проектирования самолета — тоже алгоритм.

Так какие же алгоритмы отнести к конкретной предметной области, а какие к информатике? А ведь сейчас вычислительная техника, или, правильнее сказать, информатика, используется во всех областях науки и техники.

Ясно, что здесь дело в масштабах, в уровнях общности. Но пока критериев четкого разграничения нет. В ряде случаев мы, конечно, видим, что данный алгоритм относится к частной, конкретной задаче. В других — что это общий алгоритм, применимый в весьма различных по своему физическому содержанию предметных областях. В одних случаях это алгоритм решения конкретной задачи, в других — это алгоритм разработки алгоритмов решения задач. Иначе говоря, мы в ряде случаев не сомневаемся, куда отнести алгоритм — к предметной области или к информатике. Но, к сожалению, чаще приходится встре-

чаться с такими случаями, когда вопрос классификации алгоритма неясен.

Впрочем, с подобным явлением мы сталкиваемся не только в информатике. Совсем не редко мы сомневаемся в том, куда отнести какой-то конкретный результат: к математике или механике, к биологии или химии, к химии или физике, и т. п. и т. д. Важно не забывать, что без алгоритмов предмета информатики не существует.

Я позволил себе остановиться на этом, казалось бы, совершенно очевидном вопросе именно потому, что в практической деятельности о нем все же часто забывают.

Когда-то давно, я не помню уже кто назвал математику слугой других наук. То же можно сказать и об информатике. Она существует не сама для себя, а для помощи другим наукам, другим областям человеческой деятельности. Она не занимается изучением или созданием каких-то конкретных материальных объектов или природных процессов. Информатика снабжает методами исследований другие предметные области, и естественно попытаться проанализировать, в каких областях применение информатики открывает в обозримом будущем наибольшие перспективы. Я, конечно, понимаю, что подобный прогноз обязательно будет в значительной мере субъективным, но, кстати, одной из проблем информатики является получение объективных оценок из совокупности субъективных.

Ни для кого не секрет, что первые ЭВМ создавались для расчетов в области физики и механики (атомная физика, летательная техника), и это были первые весьма эффективные применения информатики. Бурные темпы роста индустрии ЭВМ определились их применениями в области экономики и административного управления. Сначала в части «пассивной» как элементов информационно-систем, а в дальнейшем и для «активного» использования в целях поисков оптимальных решений.

Эти области применения и сейчас являются весьма важными, и я, наверное, не ошибусь, если скажу, что и сейчас они дают максимальный экономический эффект. Но уже их начинают «поджимать» применения в управлении производственными процессами (особенно гибкими производствами), в автоматизации проектирования, и, наконец, в объединении автоматизации проектирования и производства.

Но хочу обратить внимание на весьма характерное для нашего времени проникновение информатики в науки, которые еще до недавнего времени многими считались принципиально не формализуемыми, т. е.

не доступными для точных количественных методов. Исследования в этих областях науки заключались в накоплении отдельных фактов, в качественном описании объектов исследования. Эти науки и назывались описательными. Материал, накапливаемый этими науками, не давал возможности прогнозировать явления, ими изучаемые. Связи между отдельными фактами если и устанавливались, то носили качественный характер. Но если качественные факторы имеют противоположное направление действия, то без количественных оценок нельзя ничего предугадать даже о «знаке результата», о направлении развития процесса.

Информатика внесла два основных метода в решение задачи прогнозирования (диагностирования) явлений, изучаемых описательными науками: метод математического моделирования и метод распознавания образов.

Конечно, методы математического моделирования использовались задолго до появления ЭВМ. Мы уже говорили, что «законы» Ньютона — это математическая модель механических движений. «Законы» статики Архимеда — тоже математическая модель. В термодинамике, электродинамике, квантовой механике и т. д. количественные закономерности, выраженные формулами, — это математические модели.

Поразительными здесь оказались их простота и удивительная точность. Поэтому и удалось при их построении обойтись без ЭВМ.

Но какие основания есть для того, чтобы ожидать подобной простоты в явлениях, изучаемых, скажем, в биологии, медицине или социологии? Когда математическая модель построена, то решение конкретных задач — это уже «освоенная методика», но сама задача построения моделей не формализована. Это обратная задача, но снова-таки не такая, которые сейчас уже умеют решать: известна структура оператора, описывающего явления, и необходимо определить его конкретные числовые характеристики (коэффициенты уравнений, формы граничных условий и т. п.). Построение математической модели — это прежде всего определение структуры оператора, а для этого алгоритмов нет. Здесь остается лишь метод проб и ошибок, применение же его требует всей мощи современной и будущей вычислительной техники. Но если адекватная математическая модель построена, то исследователь получает в свои руки эффективнейшее оружие, вот почему так привлекателен метод математического моделирования.

Метод математического моделирования имеет один недостаток, но, правда, не в принципе, а в его современном практическом использовании. При его применении ученый находится в плену существующей математики: он пытается описать явления в новых областях с помощью известных математических структур — в основном дифференциальных уравнений, иногда с введением конечно-разностных соотношений. Но может ли эта математика описать изучаемое явление? Вспомним исторический пример. В механике от статики до развития динамики прошло примерно 2000 лет, и только создание новой математики — дифференциального и интегрального исчисления — позволило сформулировать математическую модель динамики.

Арифметики и геометрии, которыми располагал Архимед, было недостаточно для описания связей между силой и скоростью при всей гениальности Архимеда.

Поэтому понятны попытки избежать построения математических моделей для целей прогнозирования. Возможность осуществить эти цели могут дать методы распознавания образов.

Если я назвал старыми методы математического моделирования, то методы распознавания образов намного старше существования человечества. Без них невозможно никакое ориентирование в мире и для животного. Но лишь информатика превращает их в строго формализованные алгоритмы. В принципе ясно, что при использовании полной системы признаков между «пространством признаков» и «пространством объектов» может быть установлено однозначное соответствие. Но критериев априорной оценки полноты системы признаков пока нет. Это еще дело интуиции. В определенной мере достаточность системы признаков может быть достигнута за счет использования большого числа признаков (многие десятки и сотни), но это уже не под силу невооруженному человеку. Только вся мощь современной вычислительной техники может обеспечить возможность оперирования с таким числом признаков.

В наше время задача «информатизации» описательных наук многим представляется еще как некоторая абстракция, как что-то очень далекое. Но обратимся еще раз к истории.

Вся современная техника, весь ее поразительный прогресс, скажем, за последние 200 лет стал возможным только потому, что науки, на которых эта техника базируется (механика, физика, химия), были

«математизированы», и каждый новый объект мог быть заранее рассчитан.

Попробуйте представить себе, кем бы мы были сейчас, если бы каждый дом, каждый мост, каждый паровоз, каждый радиоприемник необходимо было бы создавать методом случайных проб и ошибок! А ведь в биологии, медицине, агрикультуре это и есть основной метод создания новых объектов.

А если эти науки мы превратим в точные, тогда каждый результат можно будет заранее рассчитать?

Я не хочу говорить, что это будет значить для человечества. Пусть каждый сам постарается представить себе результат.

Вот почему я считаю задачу внедрения методов информатики в «описательные» науки одной из важнейших, быть может, самой важной проблемой близкого будущего.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Моисеев Н. Н. ЛЮДИ И КИБЕРНЕТИКА. М.: Молодая гвардия, 1984.

Глушков В. М. ОСНОВЫ БЕЗБУМАЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ. М.: Наука, 1982.

Полов Э. В. ОБЩЕНИЕ С ЭВМ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ. М.: Наука, 1982.

Тыгу Э. Х. КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. М.: Наука, 1983.

Зарипов Р. Х. МАШИННЫЙ ПОИСК ВАРИАНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТВОРЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. М.: Наука, 1983.

Уинстон П. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. М.: Мир, 1980.

КИБЕРНЕТИКА. Дела практические. М.: Наука, 1984.

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ КИБЕРНЕТИКИ. Т. I, II. Киев: Укр. сов. энциклопедия, 1975.

Горение: современный взгляд на древнейший процесс

Я. Б. Зельдович, В. Б. Либрович, А. Г. Мержанов

Научившись использовать процесс горения, человечество сделало огромный шаг в своем развитии; недаром античный эпос говорит о подвиге Прометея, подарившего человечеству огонь.

Современную цивилизацию нельзя представить без паровых котлов и двигателей внутреннего сгорания. Огнестрельное оружие, использующее метательное действие пороха, и применение бризантных (детонирующих, разрушающих) взрывчатых веществ преобразовало военную технику. Взрывчатые вещества нашли и широкое мирное применение, например в горнодобывающей промышленности. Освоение космоса также основано на сжигании ракетных топлив.

КАК ПРОИСХОДИТ ГОРЕНИЕ

Мы знаем, что горение — это химическая реакция между топливом и кислородом, сопровождающаяся выделением энергии, точнее, превращением химической энергии в тепловую и другие формы энергии. Пользуясь таким определением, можно сказать, что жизнь — это горение, ведь животные, поедая пищу, способную соединяться с кислородом воздуха, обеспечивают тем самым энергетические потребности организма. Однако это очень специфический способ сжигания топлива; он осуществляется при температуре тела животного с помощью биокатализаторов — ферментов.

А как идет «обычная» химическая реакция? Она происходит при столкновении молекул. Значит, чем больше концентрация молекул кислорода (его парциальное давление), тем больше скорость реакции. Можно ожидать, что скорость пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ.

Опыт показывает, что для реакции горения характерно существование пределов, т. е. негладкая, скачкообразная за-

висимость скорости реакций от условий — давления, температуры. Вначале никакой реакции, или медленная реакция «под пределом», затем — быстрая реакция, взрыв с ярким свечением (а иногда и с разрушением аппарата) — «над пределом». Впервые такой резкий переход наблюдали Ю. Б. Харитон и З. И. Вальта в 1925 г. Детальная теория цепных реакций и теплового взрыва, которая позволила объяснить подобное поведение горючих смесей, создала мировую известность (и принесла Нобелевскую премию 1956 г.) Н. Н. Семенову. Сегодня математики создают общую теорию явлений (так называемую теорию катастроф), для которых характерна большая, существенная перестройка процесса при малом изменении параметров, его определяющих¹.

В инертной среде движение вещества выравнивает давление, теплопроводность выравнивает температуру, диффузия выравнивает концентрацию. На первый взгляд может показаться, что химическая реакция должна ускорить выравнивание концентрации: ведь там, где горючего больше, оно быстрее расходуется. В действительности же реакция горения, наоборот, создает большие перепады концентрации, температуры, а иногда и давления в пространстве.

Зажжем взрывчатую смесь, т. е. вызовем химическую реакцию в определенном месте. Начнется распространение пламени (волны дефлаграции) или детонация². Пламя — это тонкий слой, отделяющий область, где реакция заверши-

¹ Подробнее об этом см.: Арнольд В. И. Теория катастроф. — Природа, 1979, № 7, с. 86.

² Напомним, что пламя, или волна дефлаграции, — это медленное распространение горения, идущее с дозвуковыми скоростями, а детонация — это быстрое распространение горения со сверхзвуковой скоростью.



Яков Борисович Зельдович, академик, заведующий отделом теоретической физики Института физических проблем АН СССР, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Автор фундаментальных работ в области физической химии, теории элементарных частиц, ядерной физики. Совместно с Ю. Б. Харитоном заложил основы теории цепной ядерной реакции, создал школу советских физиков в области теории горения, детонации и ударных волн. В последние годы активно разрабатывает проблемы астрофизики и космологии. Лауреат Ленинской премии и Государственных премий СССР, трижды Герой Социалистического Труда, иностранный член ряда академий. Неоднократно печатался в «Природе».



Вадим Брониславович Либрович, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института проблем механики АН СССР, заведующий термогазодинамической лабораторией того же института, профессор кафедры физической и химической механики Московского физико-технического института. Занимается исследованием устойчивости горения газов и твердых топлив, влияния электрических полей на горение, вопросами турбулентного горения. Автор книг: Устойчивость пламени (совместно с А. Г. Истратовым). М., 1966; Теория нестационарного горения пороха (совместно с Я. Б. Зельдовичем, О. И. Лейпунским). М., 1975; Математическая теория горения и взрыва (совместно с Я. Б. Зельдовичем, Г. И. Баренблаттом, Г. М. Махвиладзе). М., 1980.



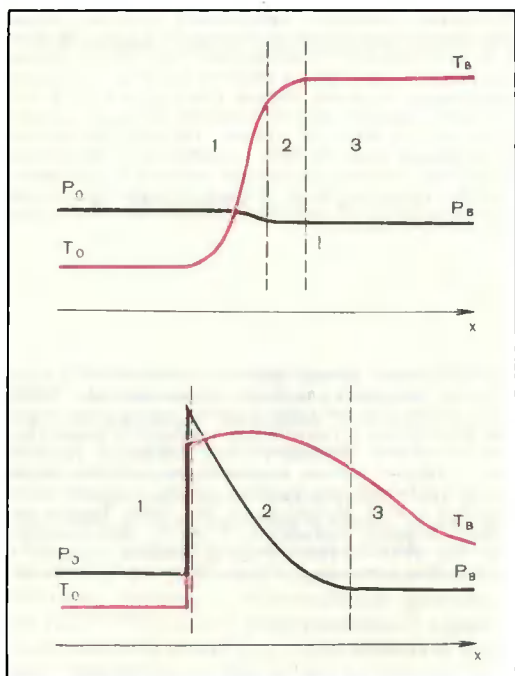
Александр Григорьевич Мержанов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором макрокинетики и газодинамики Института химической физики АН СССР, председатель Научного совета АН СССР по проблемам самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, редактор международного журнала «Archivum Combustionis». Область научных интересов — химическая физика. В «Природе» опубликовал статью (совместно с Г. С. Штейнбергом и А. С. Штейнбергом): Гейзеры, 1984, № 4, с. 32.

лась, от области, где реакция еще не началась. Реакция идет только в этом слое. Выделение тепла и (или) повышение давления в этом слое воздействует на соседний слой, который сгорает следующим. На языке современной науки принято говорить, что в термодинамически неравновесной системе возникает определенная геометрическая, пространственная структура. Изучение таких структур в настоящее время оформилось в специальную отрасль науки, называемую синергетикой³. Более узко явления распространения пла-

мени сейчас рассматриваются как частные случаи автоволновых процессов.

Авторы, занимающиеся горением в общей сложности почти 100 лет, чувствуют себя сегодня как мошеровский мечанин, пожелавший научиться дворянским манерам. Как трогательно говорит он своему учителю: «Честное слово, я и не подозревал, что вот уже более 40 лет говорю прозой». Так и мы до последнего времени даже не подозревали, что занимались теорией катастроф и синергетикой. Впрочем, в какой-то мере мы об этом догадывались. Известно было, что ситуации, аналогичные взрыву или распространению пламени, встречаются и в задачах, которые далеки от горения, например при деформации полимеров.

³ Подробнее об этом см., напр.: Кадомцев Б. Б., Рязанов А. И. Что такое синергетика? — Природа, 1983, № 8, с. 2.



Распределение температуры T и давления P — в волне дефлаграции (вверху) и в волне детонации (внизу). 1, 2, 3 — зоны исходной горючей смеси, химической реакции и продуктов горения. В волне дефлаграции давление от начального P_0 до конечного P_b изменяется незначительно; в зоне 1 исходное вещество прогревается за счет молекулярной теплопроводности без заметного химического превращения; реакция сосредоточена в сравнительно узкой области 2 при температуре, близкой и максимальной — температуре горения T_a . В детонационной волне ведущая ударная волна резко (скачкообразно) повышает давление и температуру и инициирует химическую реакцию, протекание которой сопровождается изменением температуры и давления.

ГОРЕНИЕ В ПРИРОДЕ

Начнем с нелестных слов в адрес человечества. Подобно моту, прожигающему состояние своих родителей, человечество прожигает солнечную энергию, запасенную на Земле за миллиарды лет в виде угля, нефти, газа, сланцев, торфа, и прожигает с такой расточительностью, что эти запасы могут полностью исчезнуть за сотни лет.

Природа запасла все необходимое для горения: горючий материал и поджигающее устройство — молнию. Пожары, возникающие в природе, прекращаются только тогда, когда выгорает весь горючий материал или расходуется почти весь кислород воздуха.

Пожар — великолепный газодинамический эксперимент: в поле тяжести Земли выделение тепла в атмосфере приводит к конвекции, т. е. превращению тепловой энергии в механическую. Восходящая от места горения мощная струя продуктов горения и нагретых газов образует тепловую «колонку», которая поднимается на большую высоту. Вовлекая в движение прилегающие холодные слои газа, струя порождает кольцевые вихри, выносит в верхние слои атмосферы пепел, сажу, несгоревшие мелкие частицы твердого топлива. Возмущения от пожара в верхних слоях стратифицированной (т. е. с переменной плотностью) атмосферы могут порождать так называемые внутренние волны, которые, обладая способностью распространяться не затухая на большие расстояния, огибают весь земной шар. Воздействие крупных пожаров, так же как извержений вулканов, настолько велико, что изменяется погода в целых областях Земли, а ветры перемещают продукты выноса от пожара на многие километры; затем эти продукты выпадают вместе с осадками в отдаленных от места пожара районах планеты. Несомненно, пожары усилят глобальное губительное воздействие ядерной войны.

Еще более впечатляющи пожары с образованием закрученных потоков — смерчей. Обладая большим запасом кинетической энергии вращения и большой внутренней устойчивостью, вихри с горением (горят вовлеченные в вихрь мелкие горючие компоненты) перемещаются на большие расстояния и производят серьезные разрушения. Закручивание вихрей и их усиление происходит под действием кориолисовых сил при вращении Земли.

В последнее время сделаны важные шаги в математическом моделировании естественных пожаров как на начальной стадии формирования конвективного движения в атмосфере и развития вихревых структур, так и на стадии сформировавшейся тепловой колонки, ее эволюции по мере подъема горячего газа, взаимодействия с ветром. Но многое еще остается неясным, и тем более ценны вовремя проведенные наблюдения пожа-

Пример факела пламени: пожар, созданный искусственно советскими и французскими специалистами, проверяющими новые противопожарные средства при горении больших объемов горючих жидкостей в открытой атмосфере.



ров. Не случайно, когда на американской ракетной базе произошла крупная утечка водорода и возник сильный пожар, были предприняты максимальные усилия, чтобы этим обстоятельством воспользовались ученые и провели измерения излучения, поля скоростей и температуры, а также других важных характеристик пожара.

Понимание механизма развития пожара помогает организовывать противопожарные мероприятия, в особенности на начальных стадиях пожара: ограничивать его, останавливать распространение. Что же касается оценки ситуации в целом, пожары в природе продолжают оставаться страшным стихийным бедствием.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ

Человечество расположилось в узкой пленке атмосферы, окутывающей Землю; по толщине она составляет примерно одну сотую диаметра Земли, а по заключенной в ней массе — одну миллионную долю от массы планеты. Мы уже отмечали, что природные пожары оказывают воздействие на состояние атмосферы. Но сегодня все больше влияет на атмосферу целенаправленная деятельность людей. Неуклонный рост энергетических мощностей, все большее распространение укрощенного огня — в топках и котлах ТЭЦ, фабрик и заводов, котельных городов и сел, в двигателях внутреннего сгорания и дизелях, в ракетах и авиационных двигателях — приводит к тому, что выделяемое тепло по величине становится сопоставимым с компонентами теплового баланса атмосферы.

Кроме того, растет выброс в атмосферу микроскопических конденсированных частиц — сажи, пепла, измельченного топлива, конденсированных продуктов сгорания; они изменяют оптические свойства атмосферы, и в частности соотношение между поглощенной и отраженной солнечной энергией, увеличивают «парниковый эффект», связанный с повышением концентрации углекислого газа в течение длительного временного промежутка. Кстати сказать, неопознанные летающие объекты («летающие тарелки») получили научное истолкование как турбулентные области в атмосфере с повышенной концентрацией мелких конденсированных частиц, которые, хорошо отражая свет, создают впечатление о сплошном блестящем теле.

Интенсивная энергетическая деятельность человека породила опасность вредного воздействия на флору и фауну токсичными продуктами горения: окислами серы, азота, металлов, угарным газом, канцерогенными веществами — продуктами неполного пиролиза органических топлив.

Из всех видов широко употребляемых в современной энергетике природных топлив на первое место, с точки зрения экологической чистоты, несомненно, следует поставить природный газ — почти чистый метан. Соответствующей регулировкой горелочных устройств при работе с бедными горючими смесями (с большим избытком воздуха) можно полностью избежать образования конденсированных частиц сажи; в продуктах горения отсутствует и сера. Можно добиться малого выхода окислов азота, получающихся из-за окисления азота воздуха, и малого выделения угарного газа. Образующийся при горении углекислый газ усваивается растениями и перерабатывается в кислород; в отличие от угарного газа, окислов азота и серы он не токсичен: в нормальной атмосфере содержится всегда 0,3 % углекислого газа, в то время как в легких человека концентрация его достигает нескольких процентов. Поэтому упоминать углекислый газ в одном ряду с другими, токсичными окислами, как это иногда делается, с экологической точки зрения неверно.

Образование окислов азота и угарного газа сильно зависит от условий горения. Отсюда предпочтение бедным, с большим избытком воздуха, горючим смесям, температура горения которых относительно невысока. Но такие смеси труднее сжигать. Поэтому в последнее время разрабатываются горелочные устройства с «тепловым рециклом»: часть тепла от продуктов горения передается исходной горючей смеси, облегчая ее сжигание. В таких устройствах удается сжигать прежде вообще не горевшие смеси и, кроме того, повышать производительность процесса в десятки раз. Стали использовать и форкамерное горение; в небольшой камере сгорания — форкамере — сжигается хорошо горящая обогащенная смесь, затем реагирующий газ «выплескивается» в основную камеру сгорания; в результате большая масса горючего газа быстро и полностью сгорает.

Перевод крупных городов и промышленных центров на газовое снабжение в значительной степени приведет к очи-

щению воздушного бассейна. Важно еще перевести на сжиженный газ двигатели внутреннего сгорания автотранспорта. Что касается сажи, то она образуется при пиролизе сложных углеводородных топлив, который происходит в областях, где недостает кислорода. Образовавшуюся сажу затем трудно перевести в газообразное состояние. Однако в природном газе в основном присутствует метан и угарный газ, которые при сжигании сажи не образуют.

Несомненно, самое чистое топливо — водород. Продукт его горения — вода —

меры сгорания, горелки при переводе их на работу с водородными горючими смесями. Кроме того, экологически чистый продукт — вода — обладает существенным коррозионным действием и может выводить из строя некоторые агрегаты. Иными словами, вопрос о водороде — вопрос будущего.

Поэтому, несмотря на привлекательность использования газовых горючих, сжигание в энергетических целях древнейшего вида топлива — угля — будет практиковаться еще значительное время.

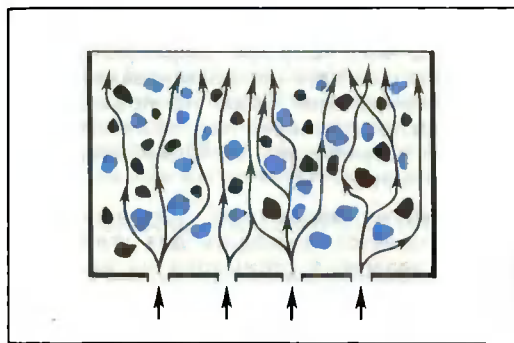


Схема сжигания угля во взвешенном слое. Цветом показаны горячие куски угля, черные детали — куски доломита. Стрелки — линии тока газа.

естественным образом входит в круговорот веществ в природе. Единственная опасность, которая остается и при горении водорода, — образование окислов азота из воздуха.

В природе запасов несвязанного водорода мало, его надо получать и притом с большими энергетическими затратами, например путем разложения воды. (Сопоставим: простейший способ получения водорода — электролиз — требует 100 % затраты электроэнергии, а КПД его использования в двигательных и энергетических установках не превышает 30 %.) Поэтому еще совсем недавно вопрос о широком использовании водорода в энергетике (за исключением ракетной техники) не ставился. Однако бурное развитие атомной энергетики позволяет рассматривать как вполне возможное получение водорода в больших количествах. Но остается пока неясной масса проблем: как обеспечить безопасную работу с водородом (ведь это легко воспламеняющийся газ), как его транспортировать и хранить, каких переделок потребуют имеющиеся ка-

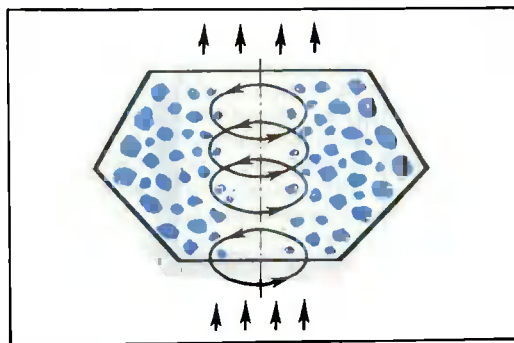


Схема циклонной топки. Обозначения те же, что и на предыдущем рисунке.

Ресурсы угля на Земле превышают ресурсы других природных горючих. В Советском Союзе имеются крупнейшие угольные месторождения: Экибастузское, Канско-Ачинское и другие с открытым залеганием угольных запасов, так что разрабатывать их удивительно дешево. Естественно, грех не воспользоваться такой возможностью, памятуя о вещих словах великого Д. И. Менделеева, что не очень разумно топить ассигнациями (Менделеев имел в виду нефть и газ, прекрасное сырье для химической промышленности).

Качество углей открытого залегания, однако, невысокое: это зольные угли, с большим содержанием воды, с примесями серы, со многими негорючими компонентами. Балласт в них достигает 40—45 %, поэтому сжигать такие угли непросто. (Это замечание, впрочем, относится ко всем угольным запасам, поскольку со временем качество угля ухудшается.) Сейчас продумываются некоторые новые варианты организации рабочего процесса в угольных топках, например сжигание угля в кипящем или взвешенном слое. Под дейст-

нием восходящего потока насыпной слой горячего угля начинает свободно витать, хорошо перемешивается с окислителем и обеспечивает интенсивный теплоотвод выделяющегося тепла в стенки и теплоотводящие элементы топки. Такая схема позволяет использовать низкокачественные сорта углей грубого помола и эффективно связывать образующиеся при горении окислы серы — для этого в кипящий слой вводится дешевый природный минерал доломит. Однако существенным недостатком этой схемы является интенсивное образо-

ванные частицы — весьма ядовиты и их очень трудно улавливать.

Принципиально иное направление использования угля — его химическая переработка в жидкие и газообразные топлива, которые, несомненно, имеют более широкую область применения. Однако такой путь значительно дороже. На повестке дня вновь стоит вопрос о подземной газификации углей как наиболее дешевом способе получения газообразного горючего. Идея о подземной газификации угля, как известно, была предложена Д. И. Менделеевым. В довоенные годы эта идея была реализована в подмосковном бассейне, как говорится, прямо в лоб: вырыли широкую шахту, на небольшой глубине организовали горение... Газификация была, но промышленного распространения не получила, поскольку потребовала больших предварительных затрат.

Сейчас подземную газификацию предполагается проводить для углей глубокого залегания (примерно на километровых глубинах, где их запасы громады, а разрабатывать их обычными, шахтными методами экономически нецелесообразно). В нефте- и газодобывающей промышленности имеются способы, которые позволяют делать необходимый гидравлический разрыв угольного пласта между двумя скважинами — питающей пласт окислителем и добывающей продукты газификации, — а также осуществлять поджиг угля на больших глубинах и при больших горных давлениях (порядка ста атмосфер).

Опыт использования глубокого подземного горения накапливается в последнее время в связи с интенсификацией добычи нефти. Оказалось возможным, организовав горение в нефтяном пласте, добывать оставшуюся в нем нефть, которую другими способами достать не удастся. Для этого в нагнетательную скважину подается воздух или кислород в чистом виде или, еще лучше, в смеси с водой; нефть в пласте поджигается, и зона горения, перемещаясь по пласту, вытесняет легкие фракции нефти через добывающую скважину. Горят лишь наиболее плохо вытесняемые тяжелые фракции; как показывают эксперименты, сгорает небольшое количество — 5—10 % от общей массы нефти в пласте. Вводимая с окислителем вода способствует более полному вытеснению нефти, играя роль переносчика тепла из зоны горения в под-

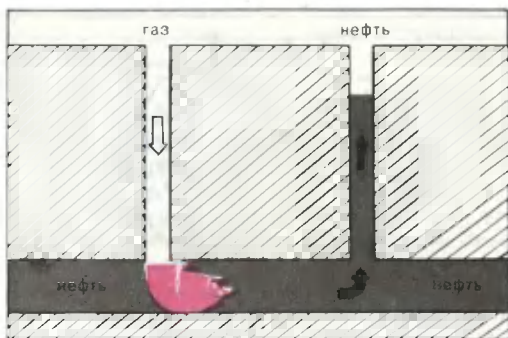


Схема внутрипластового горения. В левую, нагнетающую скважину подается газ-окислитель для поддержания горения в пласте; из правой, добывающей скважины выходит нефть, вытесняемая зоной горения. Зона горения показана цветом.

вание при механическом трении мелких, плохо горящих частиц угля, которые выносятся потоком воздуха; поэтому кипящий слой следует комбинировать с последующим дожиганием мелких фракций угля по старым прямоточным рецептам.

Другой перспективный способ сжигания угля — циклонная топка; в ней горение частиц угля происходит в закрученном газовом потоке. Центробежные силы, возникающие от вращения, разделяют (сепарируют) частицы и примеси по размерам, дополнительно дробят их, облегчают удаление жидкого шлака. Кроме того, в таких камерах можно регулировать газовую атмосферу, например вводить аммиак, который может воздействовать на кинетику образования окислов азота из азота, содержащегося в самом топливе. А при сжигании угля такие окислы азота появляются примерно в том же количестве, что и при окислении азота воздуха. Зачастую в угле присутствуют редкоземельные металлы, в небольших, правда, количествах, но их окислы — мельчайшие, субмикрон-

готовавливаемые под горение области, откуда изгоняется добываемая нефть. Внутрипластовое горение оказалось эффективным средством даже для уже полностью заводненных месторождений, в которых старыми средствами вытеснить оставшуюся нефть оказалось невозможным.

В заключение упомянем о транспорте будущего — ракетах. Для них требуется специфическое топливо с высоким удельным импульсом реактивной силы — топливо не природное, а специально синтезируемое. Кроме того, ракеты несут не только топливо, но и кислород. Затраты на производство этих компонентов велики и сильно зависят от калорийности топлива. Его продукты горения оказывают определенное воздействие на атмосферу, в особенности на ее верхние слои. Но этот вопрос требует специального рассмотрения, на нем мы останавливаться не будем.

ГОРЕНИЕ СИНТЕЗИРУЕТ ВЕЩЕСТВА

У горения появились сравнительно новые «профессии». Их можно назвать новыми, так как заявили они о себе широко и настойчиво лишь в последние 10—15 лет.

Напомним, что горение — это химическая реакция, хотя и протекающая в особой форме. Поэтому, вполне естественно, нас должны интересовать и продукты горения, которые могут быть весьма разнообразны. В традиционных приложениях, о которых шла речь выше, обычно используются различного рода топлива, дающие наибольший энергетический эффект и, как следствие этого, неинтересные в химическом отношении продукты (вода, двуокись углерода и др.). Однако процессы горения можно организовать специально с целью получения ценных продуктов. Для этого исходные системы следует выбирать на основе химических соображений, а энергетическая сторона процесса отходит на второй план — она важна лишь в той мере, в какой это необходимо для осуществления самого горения.

Такой подход лег в основу так называемого технологического горения. Нельзя сказать, что приемы технологического горения не были известны ранее. Вспомним хотя бы реакции «от запала», которые проводились в препаративной химии еще в прошлом веке. Получение сернистого ангидрида путем сжигания серы, неполное горение углеводородов с образованием сажи, «внепечная» алюминотермическая выплавка ферросплавов уже давно реализо-

ваны в промышленности. Да и знаменитый доменный процесс можно с некоторой долей условности рассматривать как вариант технологического горения.

Однако все эти процессы разрабатывались сами по себе, в отрыве друг от друга, без общей идеологии, без должного использования теории горения. На технологические проблемы горения длительное время серьезного внимания не обращали — грандиозность энергетических задач надолго и всерьез увлекла специалистов.

Ситуация начала меняться после того, как в 1967 г. в Институте химической физики АН СССР был обнаружен новый обширный класс реакций технологического горения. Речь идет о реакциях в порошковых смесях металлов (титана, циркония, гафния, ниобия, тантала и др.) с бором, углеродом, кремнием и другими неметаллами; эти реакции протекают после локального инициирования в волновом режиме. Тогда же были осуществлены и процессы сжигания металлов в азоте. Продукты таких реакций — ценнейшие тугоплавкие соединения (бориды, карбиды, силициды, нитриды) — обладают уникальными физическими свойствами. Например, карбид тантала имеет рекордную температуру плавления (4000 °C), нитрид бора — высокотемпературный изолятор, карбид титана — отличный абразив, нитрид кремния не знает конкурентов по жаропрочности, карбонитрид ниобия обладает сверхпроводящими свойствами, диселенид вольфрама — великолепная электропроводная твердая смазка и т. д. Эти и другие аналогичные соединения используются для создания материалов, работающих в так называемых экстремальных условиях — при высоких температурах и нагрузках, в потоках агрессивных сред, в глубоком вакууме, под действием проникающих излучений, в условиях высокоскоростного горения.

Итак, горение вторглось в область синтеза этих замечательных соединений. Новый метод был назван самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС).

Сейчас методом СВС получено свыше 300 соединений. Их привлекательная особенность — повышенная чистота. Горение не только синтезирует, но еще и очищает реагенты от примесей! К тому же традиционные печные методы малопродуктивны и энергоемки. Да и получение в печах качественного продукта — дело весьма непростое.

В последнее время химические возможности СВС сильно расширились. С его помощью стали получать интерметаллиды, сложные окислы, полупроводники, нестойкие гидриды — в общем, широкую гамму неорганических соединений. Расширились и химические классы реагентов. В реакциях СВС участвуют уже не только элементы, но разнообразные соединения (окислы, хлориды, фториды, гидриды, углеводороды, азиды и др.), минеральное сырье. Все это позволило процессам СВС завоевывать прочные позиции в синтетической химии неорганических соединений.

Синтез горением. Это весьма необычный процесс. В нем условия для синтеза не задаются, как, например, в печах, а создаются в результате горения. Горение и синтез тесно связаны, без одного нет другого. Образование продукта является и причиной, и следствием горения. Важно и другое. Волна синтеза, сформировавшаяся после запуска, распространяется по своим собственным законам. Влиять на нее в ходе движения фронта, проводить текущий контроль образующихся продуктов трудно, но в этом, оказывается, нет необходимости. Основы успеха в получении качественного результата могут быть заложены до начала процесса правильным выбором шихты и условий горения. Поэтому очень важно понимать, как пойдет процесс, уметь его предвычислить, предвидеть. Иными словами, СВС более тесно, нежели печные синтезы, связан с макрокинетической наукой.

Рассмотрим несколько примеров этих необычайных синтезов. При горении особо тугоплавких смесей порошков (например, тантала или ниобия с углеродом, молибдена с бором) все процессы протекают в твердой фазе; при этом не только исходные вещества, но и продукты реакции находятся в твердом состоянии даже при температуре горения. Такое чисто твердофазное горение ранее не было известно. Более того, полагалось, что для столь быстрых процессов, как горение, присутствие жидкой или газовой фаз просто необходимо.

Твердофазные реакции с твердыми продуктами протекают весьма своеобразно. В начальные моменты времени в местах контакта реагентов выделяется фаза продуктов в виде барьерного слоя, который блокирует компоненты и препятствует дальнейшему протеканию реакции. Чтобы реакция продолжалась, реагенты должны

продиффундировать навстречу друг другу, а это очень медленный процесс. Часто такие реакции, которые сами себе мешают (они называются автотормозящимися), практически завершаются на начальных стадиях, на очень малых глубинах превращения реагентов в продукты.

Как же в таком случае происходит СВС, притом с большой полнотой реакции, почему возможно само горение? Дело в том, что диффузионные процессы в твердой фазе сильно активированы и при очень высоких температурах, характерных для горения, могут протекать весьма энергично. Поэтому массообмен через барьерный слой (особенно в высокодисперсных смесях, где диффузионный путь невелик) успевает контролировать процесс, не давая ему затухнуть. Более того, оказалось, что благодаря большому тепловому эффекту реакции для распространения волны нет необходимости в полном превращении реагентов — волна может сформироваться при не очень большой глубине превращения, когда барьерные слои еще невелики. Дальнейшее протекание реакции происходит в режиме догорания, в широкой зоне за фронтом горения, но на распространение волны это уже не влияет.

Обеспечить завершенность реакции в зоне догорания — вот задача, решения которой следует добиваться в практических работах по твердофазным синтезам. Обычно этого достигают, уменьшая теплотерии горения.

Много удивительного есть в самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. В работах Института химической физики АН АрмССР были открыты процессы горения металлов в водородной среде с образованием термически нестойких гидридов. В них металл является горючим, а роль окислителя играет водород. Не сразу стало ясно, что можно методом СВС, при котором развиваются высокие температуры, синтезировать нестойкие соединения.

Посудите сами. При образовании, например, дигидрида титана выделяется столько тепла, что оно способно нагреть продукт до 2000 °С. Но при температурах выше 800 °С дигидридная фаза не может существовать — она диссоциирует с выделением водорода. Как же в таком случае идет горение? Почему при этом синтезируется дигидрид титана? Оказалось, что в ходе горения, температура которого не превышает температуру диссоциации, образуются лишь слабо гидрированные продукты — твердые растворы водорода в

металле. При этом степень диссоциации продуктов в волне горения титана в водородной среде достигает 80 %, а гидридная фаза образуется потом, когда продукт остывает, в процессе догидрирования; в результате уменьшение температуры смещает равновесие в системе металл — водород в сторону образования гидридов.

А вот пример другого рода. В Институте химии твердого тела и переработки минерального сырья в Новосибирске осуществлены СВС-процессы в смесях порошков окислов металлов (например, бария и вольфрама). Спрашивается, что здесь может гореть — ведь все компоненты уже окислены. Выяснилось, что в режиме СВС идет образование сложного окисла (со шпинельной структурой) из простых. Небольшой теплоты этой реакции оказалось достаточно для поддержания самораспространяющегося процесса.

Химические синтезы, основанные на СВС, как мы видели, разнообразны и интересны. В технической части они просты — смешали, подожгли, получили. Однако за внешней простотой скрыта необходимость глубокого понимания механизма процессов — без этого невозможно получать продукты, удовлетворяющие тонким требованиям синтетической химии. «Теоретический синтез» — так в свое время назвал СВС-процессы М. В. Келдыш.

СИНТЕЗ → СТРУКТУРА → ФОРМА

То, о чем мы рассказали, составляет лишь первую задачу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Главное в ней — так организовать процесс, чтобы синтезировать соединение заданного химического и фазового состава. Она успешно решена, и ряд продуктов СВС уже производится в промышленных масштабах.

Значительно сложнее вторая задача — получить в режиме горения материал с учетом требований, предъявляемых не только к его составу, но и структуре, свойствам. Конечно, это заманчиво. Однако, согласитесь, получение порошковых структур с заданной гранулометрией, управление пористостью продуктов, регулирование размеров зерен кристаллитов в компактных материалах и т. д. — все это очень непривычно для горения. С теорией такого «горелоческого» материаловедения дело обстоит непросто. Структура и свойства продуктов горения формируются обычно далеко за фронтом реак-

ции в результате постпроцессов, природа которых в теории горения не рассматривается. Нужны новые подходы, опирающиеся на теорию твердого тела, физико-химию металлургических процессов, но обязательно в сочетании с теорией горения. Разобраться во всем этом — дело будущего. А сейчас специалисты уже получают продукты горения в виде материалов — как простых, монофазных, так и сложных, многокомпонентных.

Проще всего обеспечить требуемый состав материала. Это достигается главным образом подбором шихты. Однако надо иметь в виду, что связь состава материала с составом шихты нетривиальна, так как при горении, особенно в многокомпонентных системах, могут протекать конкурирующие и побочные реакции. Большую помощь оказывают здесь термодинамические расчеты состава продуктов горения, которые учитывают все многообразие реакций. Практикуется ввод в шихту инертных наполнителей — они не участвуют в реакции и из шихты переходят в конечный материал. Так, например, при синтезе твердых сплавов введенные в шихту связующие металлы (никель, кобальт) лишь плавятся в волне горения и окутывают зерна карбида, образующегося в реакции СВС; тем самым обеспечивается нужная структура сплава.

В общем случае конструирование структуры материала — вопрос сложный, но с помощью полуэмпирических приемов его удается решать. Структура исходной (шихтовой) среды, предварительная обработка реагентов, условия горения, режим охлаждения продукта — вот основные факторы, позволяющие конструировать материалы с заданной структурой.

Технологические приемы получения материалов (порошкообразных, пористых, сплошных), основанные на СВС, очень эффективны. Наиболее «продвинута» с выводом на промышленный уровень технология порошковых материалов. Она основана на простых приемах измельчения продуктов СВС с последующей классификацией порошков для получения узких фракций различной дисперсности. Такие порошки завоевывают «материаловедческий рынок» как сырье для спекания изделий и нанесения покрытий, абразивы, сыпучие среды, катализаторы и т. д.

Во многих случаях, когда температура горения ниже температуры плавления продукта, он имеет пористую структуру. Поэтому получить пористый материал просто. А вот регулировать число и

Распространение волны горения по цилиндрическому образцу металлического топлива (никель + алюминий) при СВС-процессе. Показаны последовательные моменты процесса горения.

размеры пор, соотношение между закрытой и открытой пористостью, прочность пористого материала — задача трудная. Интересный факт: при горении благодаря самоочистке контакты между частицами в пористом продукте менее засорены примесями и обеспечивают большую прочность сцепления, чем у аналогичных спеченных материалов, при одном и том же уровне пористости. Методом СВС сейчас получают пористые тугоплавкие материалы для пропитки, изготовления фильтров.

Очень эффективны приемы получения компактных беспористых материалов. С этой целью СВС проводят в специальных прессформах, а неуспевший остыть продукт уплотняют. Таким способом удается получать материалы почти без пор (менее 0,2 %).

С появлением СВС «второе дыхание» начинают приобретать классические приемы горячей обработки материалов давлением — экструзия, прокатка и др. Совмещение их с СВС, в котором горение и синтезирует материал, и разогревает его до нужных температур (т. е. подготавливает для деформирования), позволяет создавать уникальные технологические процессы.

Не менее интересны и важны СВС-процессы, в которых продукты образуются в расплавленном состоянии. Это возможно, если специально создавать высококалорийные составы или вводить в горящую среду дополнительную энергию. Вот один из примеров. Смесь из порошков трехокси молибдена, алюминия и углерода помещают в герметический сосуд с давлением инертного газа порядка тысячи атмосфер (давление необходимо, чтобы хотя бы частично «задавить» газификацию продуктов горения). При горении смеси развивается высокая температура, равная примерно 4500 °С. И эта огромная температура достигается почти бесплатно, притом в достаточно больших объемах! А что с продуктом горения? Он в нашем примере состоит в основном из двух несмешивающихся жидких фаз — карбида молибдена (точнее, углерод-молибденового расплава) и окиси алюминия. В поле тяжести они разделяются — карбид молибдена тонет, а более легкая окись алю-





Изделия из безвольфрамового твердого сплава, полученные методом СВС.

миния всплывает. Материал здесь образуется классическим металлургическим способом — путем кристаллизации слитка.

Систем, которые при горении образуют расплавленные продукты, сейчас известно много. Они разнообразны и по химической природе реагентов, и по условиям горения. С их помощью получают слитки наплавочных материалов, жаропрочных и твердых сплавов, специальных сталей.

Возможности горения в конструировании материалов громадны. То, что уже достигнуто, — это лишь капля в море. Но главное сделано — сформировались основные направления работ.

А специалисты тем временем приступили к решению третьей задачи, заключающейся в прямом получении методом СВС изделий определенной формы и размеров с заданным комплексом эксплуатационных свойств при минимальной механической обработке продукта горения. Сделать так, чтобы при горении рождалось сразу изделие, пригодное к использованию, очень эффектно. Для этого надо заставить СВС-процесс одновременно (или, точнее, почти одновременно) и синтезировать компоненты материала, и формировать его структуру, и обеспечивать формообразование. Это глобальная задача, так как ее решение сможет кардинальным образом перестроить технологию машиностроения.

Направление, в котором процессы горения синтезируют вещества и конструируют материалы, быстро развивается, и мы не уверены, что предлагаемые вниманию читателя заметки уже завтра не будут выглядеть устаревшими.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ГОРЕНИЕ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Открытие самораспространяющегося высокотемпературного синтеза сыграло революционизирующую роль в технических приложениях горения. И не только потому, что проложило путь науке о горении к решению новых для него материаловедческих проблем. Более важно, что СВС позволил по-новому взглянуть на технологическое горение, понять его принципы, масштабы, возможности, изменить к нему отношение.

То, что продукты горения могут представлять технологическую ценность — понять нетрудно. Да и конкретные примеры убеждают нас в этом. Но вот стоит ли ради этого специально организовывать процесс горения? Ведь есть и другие технологические приемы, и часто один и тот же продукт может быть получен разными способами.

Для производства термически устойчивых химических продуктов, металлов, неорганических материалов сейчас повсеместно используют высокотемпературные печи — электрические или индукционные. Они универсальны, могут долго работать и поддерживать заданную температуру с достаточной точностью. В последнее время появились плазмотроны, сильно расширившие температурные возможности процессов типа печных, стали использовать лазерный нагрев, энергию взрыва и многое другое.

Нужно ли в такой ситуации еще и горение? Имеет ли оно неоспоримое технологическое преимущество? Сможет ли выдержать конкуренцию? На примере СВС, да и некоторых «старых» процессов мы убедились, что на все эти вопросы следует ответить положительно. Но попытаемся разобраться в этом с общих позиций.

Технологические черты горения в популярной форме можно выразить, используя рекламу Аэрофлота: «Быстро, удобно, выгодно».

Рассмотрим ее по частям.

«Быстро!» Потому, что велика скорость горения. Времена реакции в волне составляют доли секунды. Полное время сгорания в реакторах — секунды или, в

крайнем случае, минуты. Производительность технологического горения поэтому намного выше, чем печных процессов. Да и плазма, несмотря на очень высокую температуру, уступает по технологической производительности горению.

«Удобно!» Конечно же, проще сжигать, а не греть. И главное — не нужно сложного высокотемпературного оборудования (печей, плазмотронов). Реакторы горения просты и долговечны, а инициирование процесса никакого труда не составляет. Поэтому технологию продуктов горения легко организовать, как говорится, на «пустом месте».

«Выгодно!» И с этим тезисом полная ясность. Прежде всего напомним, что горение протекает за счет высвобождения внутренней, химической энергии и не требует внешних энергетических затрат. Поэтому использование технологического горения приводит к экономии электроэнергии. Печные и плазменные процессы, «разбазаривающие» огромное количество электроэнергии, перед этой особенностью технологического горения безропотно склоняют голову.

Все вышесказанное приводит к низким затратам на организацию процесса, положительно влияет на себестоимость — продукты горения почти всегда относительно дешевы. А если еще учесть типичное для технологического горения высокое качество целевого продукта, то выгоды несомненны.

Что еще можно занести в актив технологическому горению? Много, но отметим еще лишь, пожалуй, уникальную возможность работать с большими массами вещества, получать крупные изделия. Нагрев изнутри, а не снаружи — особенно принципиален. Химическая реакция в состоянии сделать то, что не сможет печка. В решении таких задач технологическое горение не имеет ни аналогов, ни конкурентов.

Ну а что же в пассиве? Чем приходится расплачиваться за все достоинства технологического горения? А плата простая — технологическое горение в химическом отношении не универсально. Не все системы способны к горению. Не каждую реакцию, в отличие от печей, можно осуществить в технологическом горении, она должна для этого протекать с выделением достаточного количества тепла. Поэтому выбор систем играет важнейшую, принципиальную роль.

Что можно сказать в оправдание? К счастью, реакций с тепловыделением

очень много, и поэтому реальные возможности технологического горения велики. Далее, можно комбинировать системы, проводить термически сопряженные процессы, в которых тепло от одной реакции помогает другой.

А теперь — давайте пофантазируем! Что мы можем ожидать в будущем? Обратимся сначала к «большой химии». Сколько в ней экзотермических процессов — не то что пересчитать, даже представить трудно. Но применение технологического горения сдерживается тем, что многие ценные продукты неустойчивы и при высоких температурах не образуются. Например, окисление углеводов используется в технологии для получения спиртов и других продуктов органического синтеза. Но проведение этого процесса в более жестких температурных условиях в режиме технологического горения дает другие, более простые и менее интересные продукты — воду, углекислоту. Выход, казалось бы, прост — надо уменьшать температуру горения, тем более что сделать это совсем нетрудно. Но беда в том, что существуют предельные температуры горения, ниже которых наступает погасание, и часто они оказываются все еще слишком большими. Теория горения указывает пути снижения предельных температур. Наиболее удобный из них — увеличение скорости химического превращения с помощью катализаторов.

Особенно большие возможности таит в себе гетерогенный катализ неорганических реакций. В нем проще привести в соответствие наибольшие допустимые технологические температуры с предельными температурами горения. А использование тугоплавких СВС-продуктов в качестве катализаторов или их носителей позволит во многих случаях повысить температуру и эффективность каталитических процессов.

В металлургии перспективы развития технологического горения не менее заманчивы. Возьмем хотя бы прямое получение железа из руд, минуя доменный процесс. Это проблема черной металлургии высочайшего класса, над ее решением активно работают во всем мире, и особенно успешно в ФРГ. Западногерманский процесс, приобретенный по лицензии, реализован и в СССР. С точки зрения теории горения, два положения этой всемирно известной технологии вызывают критику: использование окатышей и раздельное проведение процессов восстановления металлов и образования газа-восстановителя. Рас-

пылить руду, а не собирать ее в трудно-восстанавливаемые из-за диффузии окатыши, совместить зоны горения и восстановления, чтобы использовать активное состояние восстановителя — эти действия переводят процесс в разряд технологического горения со всеми его достоинствами. Аналогично можно восстанавливать и многие другие металлы. Лабораторная установка, созданная в Институте химической физики АН СССР, свидетельствует о больших перспективах такого направления в восстановительной металлургии.

А переработка сульфидных руд? Сейчас она проводится до удивительного нерационально: в печах кипящего слоя, при низких температурах, с получением окислов металлов (которые затем надо восстанавливать). Технологическое горение дает возможность организовать процессы в высокопроизводительных камерах сгорания с получением сразу же восстановленных металлов.

Мы уверены, что большие перспективы имеет и проблема точного литья (так называемое литье по выплавляемым моделям). Его можно организовать по простой схеме. Металл в нужном количестве «синтезируется» в реакции горения, а затем выливается в форму. Металлическое изделие, образующееся после кристаллизации, почти не требует механической обработки. Таким образом, можно решать те же проблемы экономики металла, что и в порошковой металлургии, но отказавшись от классической схемы: металлурги дают слиток, а машиностроители «перерабатывают его в стружку» (это распространенная шутка, связанная с образованием огромного количества отходов при обработке металлов резанием).

Наиболее активно горение внедряется сегодня в технологию неорганических материалов. Здесь технологическое горение (СВГ) уже твердо стоит на ногах. Решение порошковых проблем безостановочно нарастает. Методы, способы, приемы совершенствуются и разнообразятся. Тип задач расширяется. Главная перспектива — решение уникальных проблем, которые трудно одолеть привычными средствами (создание материалов с особо экстремальными свойствами, прямое получение крупных изделий и др.). Но обо всем этом уже говорилось.

Итак, у технологического горения есть большие претензии и аргументированное стремление к размаху. Жизнь покажет, насколько они реальны. А пока ясно одно — надо работать!

ВМЕСТО ЭПИЛОГА: ЕЩЕ О НЕКОТОРЫХ ИНТЕРЕСНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГОРЕНИЯ

К тому, что, традиционно, горение — источник тепла, способ создания рабочего тела, следует добавить способность горения освещать.

Обычно используется равновесное свечение газов и твердых тел, нагретых горением до высокой температуры. В последнее время стали больше внимания обращать на хемилюминесцентный, неравновесный характер излучения некоторых горючих смесей. Назовем, например, такие любопытные горючие смеси, как смесь водорода с фтором, сероуглерода с кислородом. При их горении в условиях низкого давления продукты горения — фтористый водород (в первом случае) и окись углерода (во втором) — обладают избытком колебательной энергии по сравнению с полагающимися запасами по термодинамическому равновесию, избыток, который в оптическом резонаторе может быть выведен наружу в виде когерентного излучения. И это реализовано: построены и успешно функционируют непрерывные и импульсные лазерные устройства на основе горения.

Кроме того, пламя является источником излучения в радио- и акустическом диапазонах. При горении углеводородных горючих вследствие ассоциативной ионизации в пламени образуются в избыточном количестве заряженные частицы (положительные и отрицательные ионы, электроны), которые диффундируют и рекомбинируют с разными скоростями. В результате в пламени возникает объемный электрический заряд, который, перемещаясь в турбулентном потоке, излучает электромагнитные волны. Пламя, таким образом, «шумит» в радиодиапазоне и обладает экранирующим действием, препятствующим распространению радиоволн.

Акустический шум турбулентного пламени хорошо известен людям, живущим вблизи крупных аэропортов. «Акустическое» загрязнение окружающей среды от шума двигателей реактивных самолетов происходит в значительной степени из-за горения.

Все типы излучения, возникающие в процессе горения, — оптического, радио- и акустического диапазонов — могут с успехом использоваться для дистанционной диагностики зон горения, для понимания их внутренней тепловой и химической структуры.

Кольцевой хребет Кондер

С. С. Харкевич,
доктор биологических наук
Биолого-почвенный институт
ДВНЦ АН СССР
Владивосток

В. Е. Крот
Аяно-Майская комплексная
геолого-разведочная экспедиция
с. Нелькан, Хабаровский край

Поселок Охотск и село Аян, расположенные на западном побережье Охотского моря, сыграли исключительно важную роль в изучении и освоении Дальнего Востока. Отсюда отправлялись первые экспедиции для исследования Камчатки, Северо-Востока, низовьев Амура, Сахалина, Курильских о-вов и Русской Америки. В более позднее время исследователей стали интересовать другие районы, и обширные территории Приохотья остались мало изученными, в том числе и их растительный мир.

В 50-х годах изучением этого края занимались геологи, а в конце 60-х — начале 70-х годов в Аяно-Майском районе работали лесоводы и ботаники Биолого-почвенного института Дальневосточного филиала Сибирского отделения АН СССР (ныне ДВНЦ АН СССР).

Эти края необычайно привлекательны для биологов, особенно ботаников, своеобразием растительного мира, здесь нередки места, которые, пораженные своей красотой и уникальностью, надолго остаются в памяти.

Таков кольцевой хребет Кондер, открывающийся взору путешественников еще с вертолета (именно так теперь доставляются экспедиции в Централь-

ное Приохотье). На фоне безбрежной лиственничной тайги в бассейне р. Май он издали заметен на окружающем фоне низкогогорья. Видна тонкая лента серебрищейся речушки, которая вырывается из каменной громады Кондера, и две ослепительно белые обширные наледы.

Хребет Кондер — почти идеально круглой формы геологическое образование, напоминающее древний метеоритный кратер, — поднимается над окружающим его плато на 700 м, а в своей высшей точке он достигает почти 1400 м над ур. м. Диаметр кольца — 7—8 км, его внешние склоны, покрытые крупнообломочными и глыбовыми осыпями, круто опускаются к низкогогорью. В «цирке» берет начало река с тем же, что и хребет, названием. Зимой в речной долине образуются две наледы, в некоторые годы не стаивающие все лето.

Впервые Кондер был обнаружен геологом В. П. Кулешом в 1936 г., а обстоятельное геологическое описание хребта дали А. А. Ельянов и Г. В. Андреев только в 1960 г.

Хребет Кондер — уникальное геологическое образование. Центральная часть его чаша, «дно», сложено глубинными магматическими ультраосновными породами, состоящими преимущественно из дунитов зеленовато-желтого цвета. Дно из дунитов окружено узким кольцом косявитов (те и другие магматические образования относятся к позднепротерозойскому времени), которое в свою очередь окаймлено диоритами и другими интрузивными породами раннемелового периода. Вмещающие магматический массив породы — это верхнепротерозойские песчаники и алевриты. Иногда от магматических пород они отделены

участками, сложенными из гнейсов — наиболее древних образований этого района. Их возраст датируется ранним протерозоем.

Диориты, гнейсы и песчаники слагают сам кольцевой хребет и окружают его извне, образуя периферическую часть исходно куполовидной структуры. К превращению первично образовавшегося купола (интрузии в результате внедрения подняли в виде свода породы осадочного чехла) в современную чашеобразную форму Кондера привели последовательные геологические события. Видимо, благодаря более сильному растрескиванию эти породы подверглись в дальнейшем разрушению, эрозии. Достигнув поверхности магматического тела, разрушения продолжались, но уже за счет более легкого выветривания ультраосновных пород по сравнению с вмещающими их диоритами. Вдоль крупного разлома образовалась долина р. Кондер, по которой происходил вынос материала на север за пределы кольца.

Таким образом, массив Кондер в геоморфологическом отношении представляет собой резко выраженное инверсионное (обращенное) образование, в котором на месте купола возникла чашеобразная котловина. Горные породы, образующие большую часть массива Кондер, типичны скорее для Кольского п-ова, а не для Северо-Восточной Азии. На Дальнем Востоке и в юго-восточной Якутии они экзотичны и представлены лишь в массивах Чад (южнее с. Нелькан в Центральном Приохотье), Инаглинском (в Якутии) и в немногих других горах.

Насколько живописен кажущийся вначале мрачноватым ландшафт Кондера, настолько



Хребет Кондер. Вдали видны две наледы и убагающая на север речка.

же серые невзрачные с первого взгляда горные породы его оказываются интересными и красивыми при детальном изучении. Геолог найдет здесь кристаллы нефелина (до 10 см длиной) и столбчатые, похожие на карандаши, черные кристаллы эг-

рина (до 20 см в длину и около 2 см толщиной); среди нефелиновых сиенитов можно встретить волокнистые агрегаты голубовато-зеленого серпентина и красные — эвдиалита (лопарской крови), в числе обычных кальцифиров и карбонатов попадают и более редкие — белые и голубые разновидности — прекрасный поделочный камень; есть крупные чешуи слюды (светлого мусковита и коричневого флогопита) и чер-

ный пироксенит с яркими точечными включениями малахита.

Геологическая история и геоморфологические особенности Кондера в значительной степени предопределили состав и облик богатого и разнообразного растительного мира. Таежные леса из ели аянской и сибирской в окружении светлых лиственничных и сосновых кажутся своеобразным темно-зеленым оазисом. Хотя из-за хорошего дренажа территории

почва слабо заболочена, первенство среди травянистой растительности принадлежит все же осоковым (их 30 видов). Здесь 20 видов розоцветных, 15 вересковых, среди которых встречаются вечнозеленые рододендроны (золотистый и мелколистный). В таежных лесах почти 50 видов деревьев и кустарников, а вместе с полукустарничками (рябинником, дриадой, некоторыми полынками и др.) общее количество травянистых форм превышает 60 видов. Довольно много растений со съедобными плодами: это рябина, три вида смородины (дикуша, душистая и печальная), жимолость, голубика, брусника и другие.

Растений, встречающихся только на хребте Кондер, мы не обнаружили, но есть виды, эндемичные для Восточной Сибири и Дальнего Востока. Один из них — болотник Стеллера (*Limnæ stelleri*), относящийся к единственному эндемичному роду злаков в нашей стране (второй вид — болотник Верещагина — распространен на Алтае); другое эндемичное растение — мятлик колымский (*Poa kolymensis*), а также считавшийся узким эндемиком Охотии — лихнис аянский (*Lychnis ajanensis*). Примечательно, что очень редкая бородиния (*Borodinia baicalensis*, семейство крестоцветных), считавшаяся эндемичным родом Забайкалья, была найдена на хребте Кондер.

Есть здесь растения, для которых хребет Кондер — северная граница ареала (например, древовидная ива — *Salix cardiophylla*). Примечательна дицентра (*Dicentra peregrina*), имеющая флорогенетические связи с Северной Америкой. В сосново-лиственничных лесах встречается толокнянка (*Arctostaphylos uva-ursi*) — вечнозеленый стелющийся кустарничек — ареал которого простирается через Евразию и Северную Америку. Хребет Кондер находится как бы на перекрестке ареалов растений, свойственных как соседним, так и более удаленным территориям. Однако преобладают все же таежные виды, реже встречаются типичные аркто-альпийские и арктические.

На сравнительно неболь-

шой чаще Кондера представлены почти все лесные формации, характерные для территории, лежащей севернее Амура: лиственничники, сосняки, ельники, каменноберезняки, криволесяе из кедрового стланника и ольховника.

В распределении растительности на внутренних склонах хребта прослеживается вертикальная смена лесных поясов. От подножия до высоты примерно 800 м над ур. м. растут сосновые и лиственничные леса с отдельными массивами ели сибирской; выше (до 1000 м над ур. м.) их сменяют леса из ели аянской; дальше стометровую полосу (по вертикали) занимают березняки из березы шерстистой, или каменной, за которыми идут высокогорные пояса: подгольцовый с обширными зарослями кедрового стланника, где в урожайные годы его семенами кормятся многие звери и птицы, и гольцовый с типичной для горной тундры растительностью.

Речка Кондер во многих местах течет среди ивняков, в которых попадает ремень с мощными лопуховидными листьями. Характерная для гор Восточной Сибири и севера Дальнего Востока зеленая ольха, или ольховник занимает места с постоянным проточным увлажнением и распространена от подножия до гольцового пояса.

Налеги окаймлены обширными зарослями низенькой ивы скальной, в которых встречается и карликовая береза. Чуть дальше от наледей небольшими куртинками растет копеечник (*Hedysarum alpinum*) с длинными узкими кистями пурпурных цветков, а по опушкам ельника — ремень. На небольшой площади, по периметру наледей, летом можно проследить все фазы развития растений: один и тот же вид у края наледей только входит в пору естественного весеннего роста, по мере удаления от кромки льда растения уже цветут, а еще дальше — плодоносят.

Аянская ель растет на Кондере в местах, где поверхность почвы обильно увлажняется проточной водой; по хребту проходит северная граница ареала ели. Если придер-

живаться идеи о горном происхождении темнохвойной тайги, то вполне возможно, что современные ельники на Кондере представляют собой обедненные реликтовые группировки первобытной горной тайги, и тогда хребет Кондер — единственный в своем роде оазис древних таежных лесов.

В отличие от мрачных почти без единой травинки ельников, в березняках из каменной березы обилие цветущих растений, причем многие виды своими размерами напоминают крупнотравье Камчатки. Это аконит, живокость, таволжник, недоспелка, вейник и др.

В подгольцовом поясе господствует кедровый стланник, а в гольцовом развита растительность, свойственная кустарничковой, реже — лишайниково-щебнистой тундре. На крупных каменных глыбах, рассыпанных по склонам, много разноцветных накипных лишайников, создающих причудливые живые наскальные рисунки.

Кондер как уникальное природное образование только начинаю раскрывать свои тайны геологам; нельзя сказать, что полностью изучен его растительный и животный мир. И геологи, и зоологи, и ботаники, а возможно и палеоботаники, по-видимому, найдут здесь немало интересного и нового, способного объяснить зависимость и взаимную обусловленность растительного покрова и животного мира от геологических и геоморфологических структур.

Центральное Приохотье, в том числе и хребет Кондер, труднодоступно и удалено от населенных пунктов, и пока ему не угрожает антропогенное воздействие. Тем не менее за абсолютную сохранность Кондера в будущем не придется беспокоиться лишь в том случае, если в Центральном Приохотье будет создан заповедник, организация которого сейчас обсуждается¹.

¹ Харкевич С. С., Манько Ю. И., Васильев Н. Г., Животченко В. И. Создать Джугджурский заповедник. — Природа, 1983, № 4, с. 35.

Прогноз ледникового стока

М. Б. Дюргеров



Марк Борисович Дюргеров, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела гляциологии Института географии АН СССР. Занимается изучением процессов массо- и энергообмена ледников. Участник многочисленных экспедиций в полярные и горноледниковые области. В «Природе» опубликовал статьи: Гляциология высочайших ледников Памира (совместно с Н. А. Урумбаевым; 1978, № 9); Через Центральную Антарктиду (1983, № 7).

Реки и озера, дождь и снег — органично вошедшие в нашу повседневность источники воды. Другое дело — горные ледники. Их необычность не только в удаленности от местобитания людей, но и в самой их странной природе и поведении. Непрерывно движение этой твердой и самой холодной на Земле горной породы. Зимой горный ледник — безжизненная белая пустыня, оживающая лишь на несколько коротких летних месяцев и дающая жизнь полноводным горным рекам.

Наличие собственного движения, приход массы в твердом виде из атмосферы (снег) и расход массы в виде стока воды — главные отличия горных ледников от множества гидрологических, водных объектов.

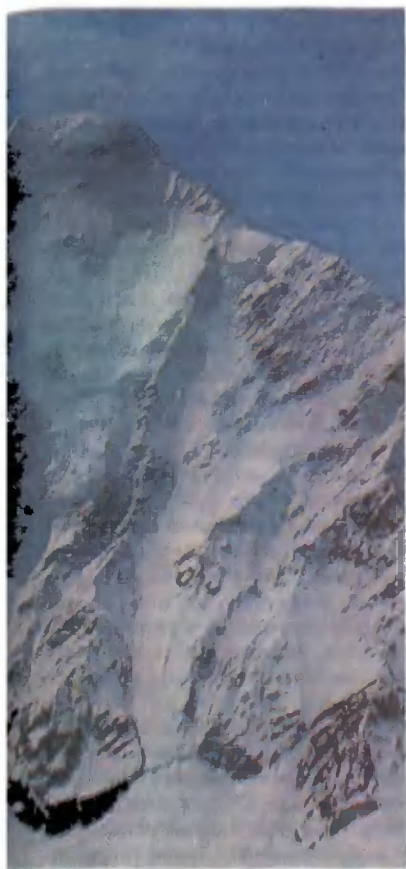
Небольшие белые пятнышки на темном-коричневом фоне. Так выглядят ледники на картах мелкого масштаба. Количество законсервированной в них воды невелико — всего около 40 тыс. км³. Это, правда, намного больше, чем запасов воды в водохранилищах, но очень мало по сравнению с такими ее источниками, как подземные воды или хранилища пресных вод в ледниковых покровах Антарктиды и Гренландии. В целом вода от таяния горных ледников вносит небольшой вклад в речной сток. Так, для бассейна Северного Ледовитого океана — это всего лишь 1 % от речного стока, Тихого океана — 0,5 %,

Азовского и Черного морей — 1,5 %¹. Однако имеются на Земле такие районы, где вода от таяния ледников жизненно необходима. Всего 20 км³ пресной воды в год поступает на засушливые равнины Средней Азии от высокогорных ледников Памира и Тянь-Шаня, но без них невозможно земледелие на огромных территориях. В течение вегетационного периода ледниковый сток Средней Азии составляет 37 % от речного, в бассейне Амударьи — почти 45 %, Аральского моря — 40 %. Доля ледникового стока возрастает в засушливые годы, и в этом гидрологическое своеобразие ледников.

Состояние ледников зависит, в общих чертах, от количества снега, накапливающегося на них за зиму, и от суммарного тепла, поступающего от Солнца и из атмосферы в летние месяцы. Чем больше первого и меньше второго, тем более разрастаются ледники. Приход и расход массы, ее баланс за год или более длительный период времени являются количественным выражением режима ледника. Положительный баланс — ледник наступает, отрицательный баланс — ледник отступает. Естественно, что в жаркие и засушливые периоды баланс ледника отри-

¹ Кренке А. Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л., 1982.





Ледники в верховьях р. Баксан.

Метеостанция в области питания горного ледника. Измеряемые здесь метеорологические параметры позволяют рассчитывать баланс ледника и ледниковый сток.

Фиксация положения фронта талой воды с помощью красящего вещества. Эти измерения — одна из операций, позволяющая определить скорость добегания талой воды до русла реки.

Источники ледниковой реки.



цательный и он расходует много больше того, чем получил из атмосферы в виде осадков. В такие годы ледники могут отдавать до 1—2 % своей массы. За несколько десятилетий конца прошлого и до 70-х годов текущего столетия ледники Земли существенно сократили свои размеры. По подсчетам гидролога Р. К. Клиге, общий некомпенсированный расход горных ледников на таяние в период с 1894 по 1975 г. составлял в среднем 66 км^3 в год. А общее сокращение объема горного оледенения Земли оценивается им в 5412 км^3 (14 % от современного объема)². В последнее десятилетие ледники начали вновь расти. Особенно отчетлива эта тенденция в районах с морским климатом, например в Альпах.

А как ведет себя при этом ледниковый сток? Совершенно очевидно, что при отрицательном балансе массы, когда расходуются на таяние многолетние запасы льда, сток увеличивается. Но так не может продолжаться долго. Некомпенсированный расход быстро приводит к сокращению площади и объема ледников. Начиная с некоторого момента объем стока начинает уменьшаться.

Поэтому исследование закономерностей формирования и прогноза ледникового стока тесно связано с изучением баланса массы ледников. Расходную составляющую баланса массы горных ледников можно считать приблизительно равной стоку.

Если на шкале времени разложить весь спектр колебаний ледникового стока, то оказывается, что высокочастотная его составляющая — секунды, часы, сутки, вплоть до года — может быть изучена только экспериментально, при непосредственном контакте с ледником. Нужно вбуриться в его тело скважинами, установить датчики, самописцы расходов воды. Эксперимент длится несколько лет, и процесс формирования ледникового стока становится ясен даже в деталях. Но незаметно эксперимент перерождается в сбор стандартной информации, набирается статистика. Меняется цель исследований. Теперь они призваны решать другую задачу, имеющую отношение к низкочастотным колебаниям стока. Такие многолетние и вековые колебания стока откликаются на колебания климата через изменение размеров ледников.

Задолго до того, как человек научился записывать свои наблюдения, лед-

ники покрывали обширные пространства Европы и Северной Америки. Тогда «...случались ледниковые «взрывы», намного превосходящие по масштабам те, свидетелем которых стал современный человек. Некоторые величайшие озера мира образовались в результате отступления ледников... Глубокие долины, по которым теперь текут реки, слишком маленькие для того, чтобы они могли их прорезать, или в некоторых случаях вообще лишенные текучей воды, были созданы древними потопами»³. Благодаря быстрому, почти катастрофическому разрушению, таянию, ледниковых покровов прошлого (18—10 тыс. лет назад) уровень Мирового океана поднялся более чем на 100 м. Таяние всех современных горных ледников даст едва заметную прибавку уровня океана. Но не просто предсказать, что произойдет, если наземное оледенение начнет нарастать.

Изучение всего спектра колебаний ледникового стока только начинается. Вернее, ищутся подходы к постановке задачи в региональном и глобальном масштабах. Значит, нужны идеи, прежде всего в применении косвенных методов и расчетов.

Задача изучения природы ледникового стока была сформулирована в программе Международного гидрологического десятилетия (МГД). Оно проводилось с 1965 по 1974 г., и ледники были включены в программу наблюдений в качестве водных объектов. Основной задачей исследований считалось совместное изучение балансов тепла, воды и льда в так называемых репрезентативных горноледниковых бассейнах МГД. Одним из главных критериев по выбору таких бассейнов являлись высокая степень оледенения, доля площади ледников в общей водосборной площади бассейна.

Репрезентативный ледник Джанкуат, на котором в течение многих лет работает гляциологическая экспедиция — один из 27 тыс. ледников, зарегистрированных в «Каталоге ледников СССР». Ледник вместе с бассейном (степень оледенения 48 %) принадлежит к семи избранным в качестве репрезентативных ледникам в горных районах нашей страны, на которых и проводились работы по программе МГД. На Западном, Восточном и Центральном Кавказе это были горноледниковые бассейны с ледниками Марухский, Гергети и Джанкуат; на Памиро-Алае — ледник Абрамова, в Заилийском Алатау — ледник

² Клиге Р. К. История формирования поверхностных вод гидросферы. М., 1979.

³ Дайсон Д. В мире льда. Л., 1966.

Центральный Туюксу, на Алтае — ледник Актру и в горах Полярного Урала — небольшие ледники ИГАН и Обручева. Правильнее подобные ледники и бассейны именовать не репрезентативными, а опорными, поскольку их репрезентативность по отношению ко всей совокупности ледников данной горной страны должна была выявиться только после окончания наблюдений, а в начале работ это еще только предполагалось.

Вот и ледник Джанкуат — его репрезентативность ко всему спектру условий формирования ледникового стока тоже предполагалась. Средних размеров ледник, площадью 3 км², расположен в живописной высокогорной долине Адылсу (приток р. Баксан) у самой водораздельной части Главного Кавказского хребта. Ледник спускается с почти четырехкилометровой высоты крутым потоком с перепадом высот почти в тысячу метров. Как и большинство ледников Кавказа, Джанкуат отступал в XX в. С конца прошлого столетия его площадь сократилась на 30 %. Значит, за большой интервал времени ледник по своему интегральному режиму представлен по отношению к оледенению Кавказа.

Немаловажным условием постановки многолетних экспериментальных наблюдений на таких труднодоступных и сложных объектах, как ледники, является их доступность и близость к центрам цивилизации (в экологическом смысле условие далекое от репрезентативности!).

От Джанкуата до ближайшего альпинистского лагеря полтора часа ходьбы. До остановки автобуса — три часа. До аэропорта — четыре часа на автобусе; завтракаешь в Москве, дома, а к вечеру поднимаешься к маленькой фанерной хижине в километре от ледника. Рядом вертолетная площадка, она же — футбольное поле. В разгар полевого сезона здесь два десятка палаток. За десять лет МГД на Джанкуате работали специалисты многих профессий: от главных производителей работ — гляциологов и гидрологов — до геофизиков, физиков, математиков, механиков, ботаников, метеорологов.

Закончилось МГД и, кажется, почти все стало известно о современном режиме ледника. Основные результаты опубликованы в десятках статей и монографиях⁴.

Но как программа МГД была следствием Международного геофизического года, так и МГД породила новые проблемы и программы. Они в прогнозировании и расчетах ледникового стока — Международный гидрологический проект, а в гляциологии это бессрочная программа наблюдений за колебаниями ледников. Впрочем, перспектива бесконечно долгих наблюдений вряд ли кого устраивает. Поэтому, чтобы расширить временной диапазон представлений о ледниках и стоке с них воды, можно заглянуть в прошлое, недалекое, а потому достаточно достоверное.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛЕДНИКОВОГО СТОКА

Хижина гляциологов стоит на небольшом возвышении. Поросшая редкой травой и кустами рододендронов старая конечная морена ледника. Здесь Джанкуат приостановился на время в своем вековом отступании. Это было в 1910 г. К 1930 г. ледник отступил еще на 400 м и там постоял, насыпал поперечный вал морены через долину. Высота вала метров десять, и он уже начал зарастать травой. А вниз по долине от домика еще один вал, высотой тридцать-сорок метров, заросший кустарником. Здесь уже успела сформироваться почва. Датируется он серединой XVIII в. Тогда Джанкуат сливался с соседним ледником Башкарой. В едином потоке с ним текли они вниз по долине и, возможно, сливались с самым крупным ледником в Адылсу Шхельдой.

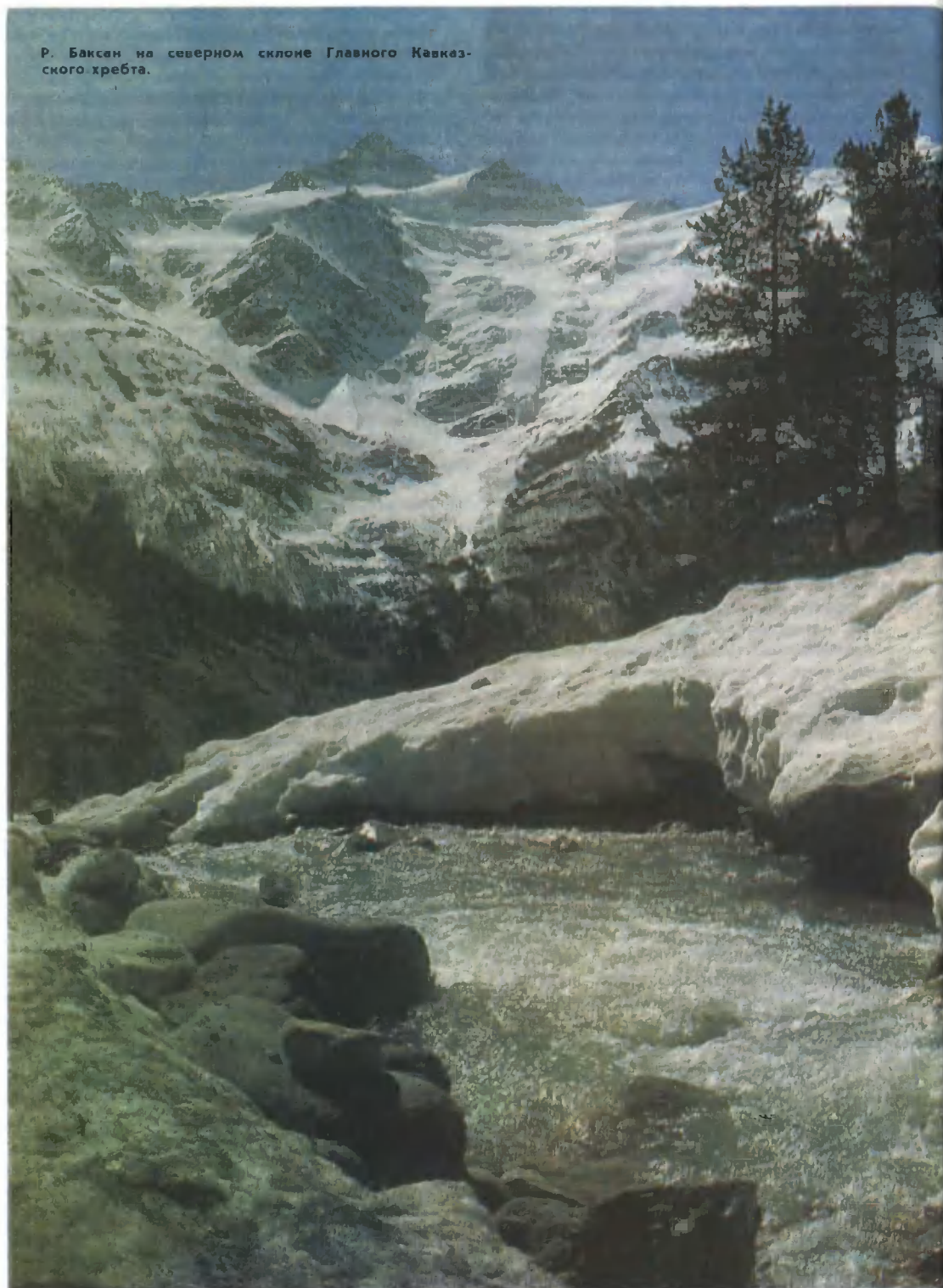
Вообще, конечно, моренные валы фиксируют положение фронта отступающего ледника. А по боковым моренам, между которыми, как в берега, вложено современное тело ледника, можно ориентировочно определить прежнюю высоту поверхности ледника. Она была метров на 80—100 выше современной.

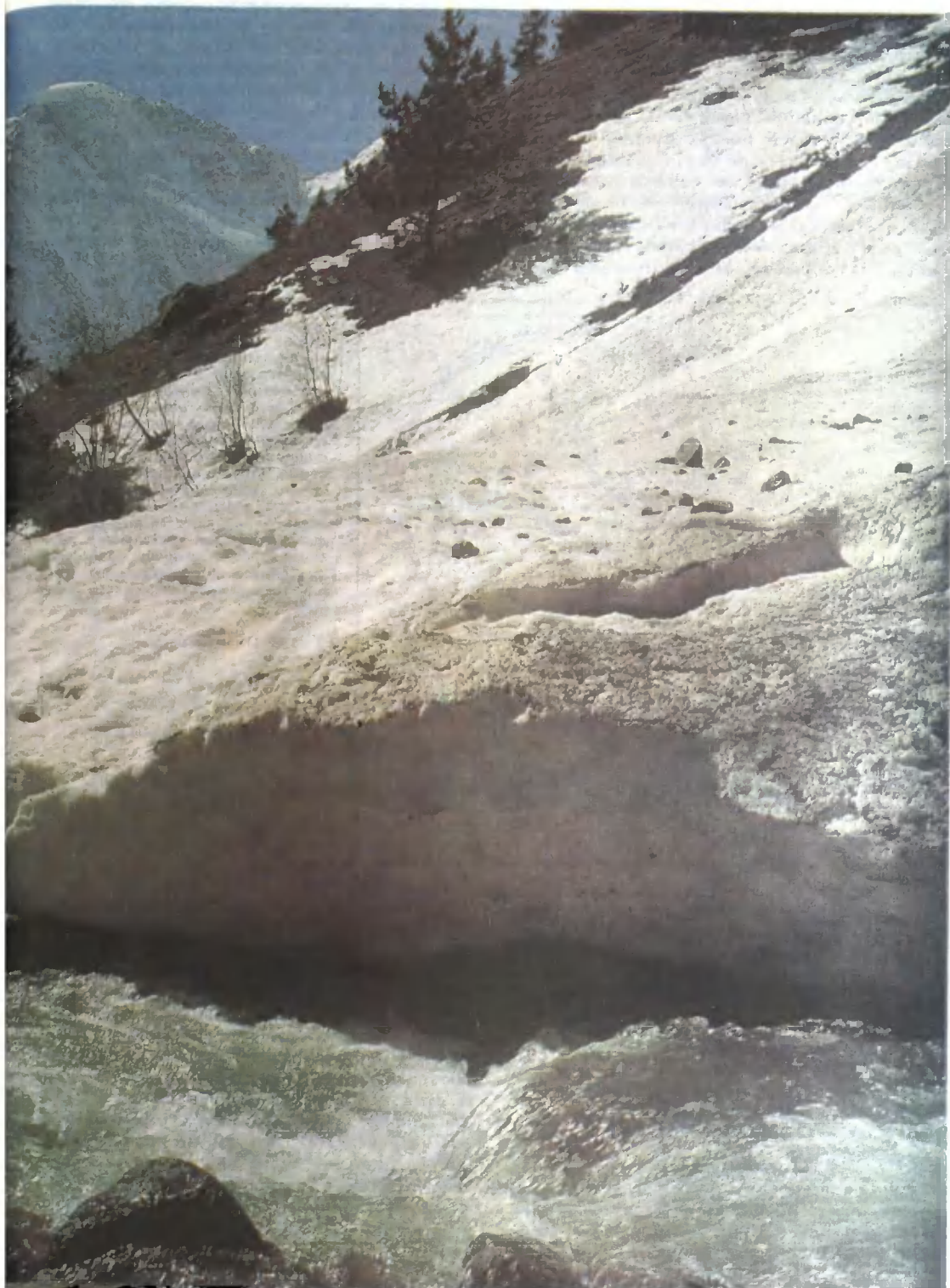
На каждую стадию стационарного положения фронта ледника Джанкуат, отмеченного валами конечных морен, рассчитана его площадь, толщина льда и объем.

Год	Длина, км	Площадь, км ²	Средняя толщина льда, м	Объем льда, км ³
1850	4,1	6,1	99	0,60
1910	3,7	4,6	84	0,39
1930	3,4	4,4	74	0,33
1968	2,9	3,7	49	0,18

⁴ См., напр.: Голубев Г. Н. Гидрология ледников. Л., 1976; Голубев Г. Н., Дюргеров М. Б., Маркин В. А. и др. Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ). Л., 1978.

Р. Баксан на северном склоне Главного Кавказского хребта.

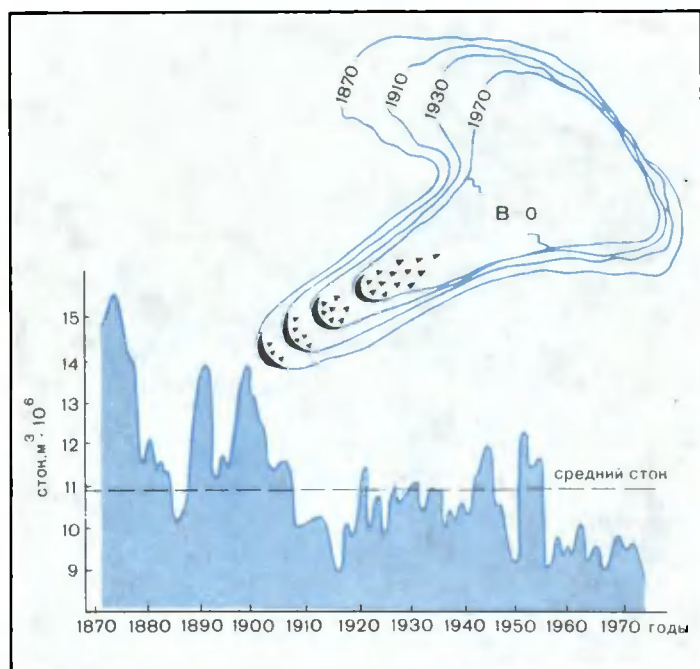




Теперь остается рассчитать, реконструировать баланс массы ледника. В гляциологии разработана общая схема реконструкции двух главных составляющих баланса массы — аккумуляции снега (приход массы) и абляции снега и льда (расход массы). Для такой реконструкции используются эмпирические связи между ними и метеорологическими параметрами, измеренными на ближайшей метеорологической станции, имеющей наиболее длинный ряд наблюдений. Осадки за зимние месяцы P_w определяют аккумуляцию сне-

ледника на каждый год за период времени, датированный его конечноморенными валами, и умножая на годовые, реконструированные по метеорологическим данным величины B , получаем баланс массы за достаточно хорошо известную нам стадию отступления ледника. Величины баланса имеют высокую отрицательную корреляцию с объемом стока с ледника. Рассмотрим подробно, как изменялся сток.

Он имеет общую тенденцию к снижению при сокращении площади ледника и за последний век уменьшился примерно



Изменение стока [внизу] и размеров ледника Джанкуат [вверху]. Общая тенденция к сокращению ледникового стока отчетливо проявляется при сокращении размеров ледника. Конечные моренные валы фиксируют положение фронта отступающего ледника и приурочены к периодом временного стационарирования фронта. Периодические увеличения объема ледникового стока связаны с климатическими колебаниями и наиболее отчетливо проявляются перед каждым очередным отступанием ледника. $B=0$ — граница, разделяющая области положительного и отрицательного баланса массы ледника.

- Граница ледника
- Морена
- Моренные валы

га, или зимний баланс ледника (B_w). Средняя летняя температура воздуха $t_{\text{л}}^{\circ}$ является хорошим показателем суммарной энергии солнца и атмосферы, расходуемой на таяние и испарение (абляцию). Интегральная величина абляции — это расход массы, летний баланс ($B_{\text{л}}$). В общем случае баланс массы ледника можно выразить как:

$$B = \alpha P_w - (\beta + t_{\text{л}}^{\circ})^n,$$

где $t_{\text{л}}^{\circ}$ — температура воздуха на высоте фирновой границы на леднике, α , β , n — эмпирические коэффициенты, получаемые по данным измерений на отдельных ледниках или крупных ледниковых системах.

Линейно интерполируя площадь

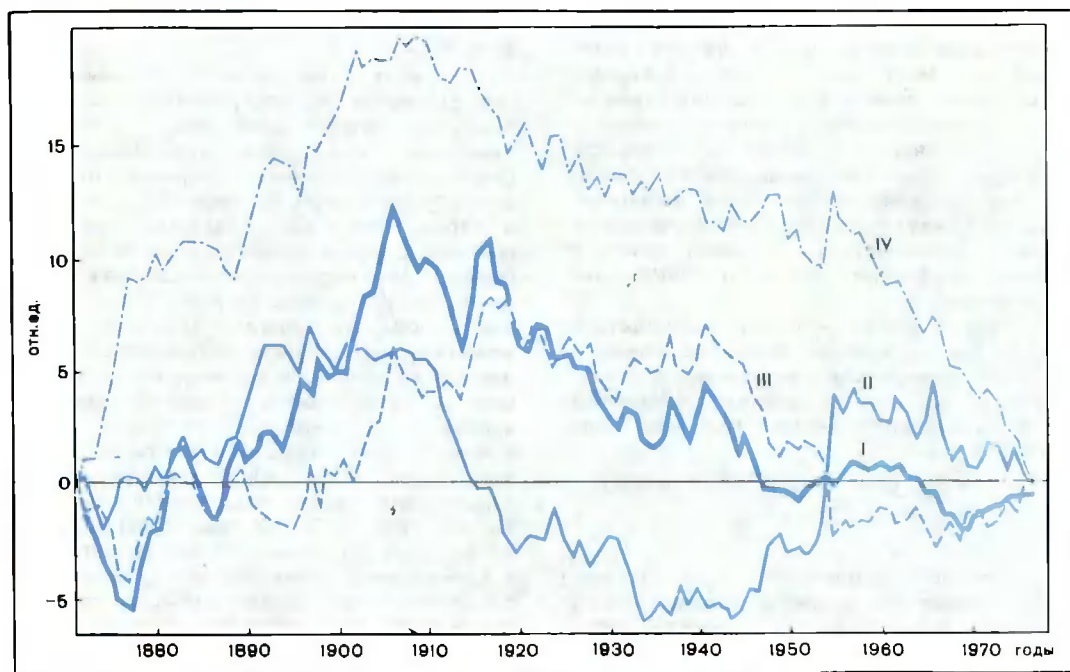
в 1,5 раза. А в деталях колебания стока происходили примерно так, как показано на одном из рисунков. В самом начале стадии отступления, например при потеплении, ледник еще некоторое время стационарен, хотя таяние и сток возрастают. Но постепенно масса ледника уменьшается, и он начинает отступать и утоняться. Снижается скорость течения льда, а сток все возрастает. Начальная стадия отступления и увеличения стока вызваны климатическими причинами. При продолжающемся устойчивом отступании объем стока определяется двумя процессами — увеличением таяния и уменьшением площади. Эти процессы разнонаправленно действуют на сток. Достигнув максимума в первую стадию деградации, сток

затем начинает уменьшаться. Как бы ни была велика климатическая тенденция к потеплению, но увеличения стока уже не произойдет. Лишь в аномально теплые сухие годы появляются крутые пики на общем фоне снижения объема стока.

Казалось бы, процесс умирания ледника необратим. Но наиболее крупные и приспособленные ледники имеют ряд защитных механизмов. Один из них — прикрыться непробиваемым для солнечных лучей чехлом из вытаивающих на поверхность камней; в теле ледника их concentra-

сплошным чехлом морены — настоящая каменная мостовая. На ней часто формируется почвенный покров и вырастают целые рощи.

Однако и под такими мостовыми ледник продолжает жить. Он не теряет окончательно связи с активной верхней частью ледника. Зачастую такие мертвые языки ледников создают подпруживающий эффект напиранием сверху массам льда. Масса накапливается, и набирает объем область питания ледника. Скорость течения возрастает, и растут напряжения в



Восстановленные по метеорологическим данным годовой ход аккумуляции (I), абляции (II), баланса массы (III) и ледникового стока (IV) ледника Джанкуат. Они представлены в сильно сглаженном виде и демонстрируют направленность процесса внешнего массообмена опорного ледника Джанкуат за последнее столетие, когда проводились метеорологические наблюдения и были начаты в нашей стране первые наблюдения за ледниками.

ция иногда превышает 5 %. Это внутриледниковая морена. При таянии ледника на его поверхности собирается все больше моренного материала. Когда толщина моренного чехла достигает метра, таяние под ним полностью прекращается. Крупные отступающие ледники Кавказа, Памира и других районов на многие километры вверх по своему течению забронированы

толще. Волна сжатия — она часто бывает хорошо видна на поверхности в виде гигантской ледяной волны — давит на язык ледника. Происходят сколы, тело ледника дробится на блоки, скорость движения льда возрастает на один-два порядка, и язык ледника продвигается вниз по долине. Так, например, происходит с ледником Медвежий на Памире каждые 10—14 лет. Его язык продвигается за несколько недель вниз по долине на 1,5—2 км, переноса до 300 млн т льда⁵.

В преобладающем большинстве случаев все происходит гораздо спокойнее,

⁵ Долгушин Л. Д., Осипова Г. Б. Пульсирующие ледники. Л., 1982.

без катастроф, даже незаметно для глаза. Ледник постепенно продвигается вперед — закончилось вынужденное отступление ледника. Теперь его язык поползет вниз до какого-то нового рубежа и встанет на многолетнюю стоянку, насыпая перед фронтом исполинский вал морены, своеобразную визитную карточку.

Как поведет себя сток при наступлении ледника, мы не знаем в подробностях, поскольку наблюдения периода МГД охватили только стационарные или отступающие ледники. Очевидно, сток будет возрастать, но прежде он пройдет через фазу спада.

Правильна ли наша реконструкция ледникового стока или в чем-то ошибочна — может быть, не столь и важно: та вода давно утекла. А вот прогноз стока — дело ответственное. Однако имеются веские основания обходить стороной проблему прогноза ледникового стока. Как мы видели, он является функцией климатических параметров и на их прогнозе должен базироваться. А такой прогноз весьма проблематичен и, главное, неоднозначен.

Тем не менее можно не дожидаться разработки надежного прогноза климата в зоне формирования ледникового стока, а пойти по пути создания собственно гляциологического метода прогноза ледникового стока.

СНЕГОВАЯ ГРАНИЦА НА ЛЕДНИКЕ И ПРОГНОЗ СТОКА

Прогноз ледникового стока может быть построен на прогнозе баланса массы ледника, а он, как мы видели, есть функция климата и меняющихся размеров ледника. Имея, например, длинный ряд наблюдений за балансом массы, можно решить и на прогноз. Но длинных рядов наблюдений за балансом нет. Имеющиеся самые длинные ряды в 30, максимум 40 лет (ледник Стур в Шведской Лапландии), показывают очень сильную изменчивость баланса и потому явно недостаточны по продолжительности для прогноза. Кроме того, существует еще и цикличность в ходе баланса массы, и ее периоды пока не установлены. И, вроде бы, снова напрашивается единственное решение, выход из создавшейся ситуации — продолжать накапливать данные, увеличивать ряды наблюдений за балансом массы ледников. Такой подход, решаемый в гидрологии при помощи создания широкой сети станций и постов для гляциологии, по многим понятным причинам неприемлем. Выход

из положения надо искать в особых свойствах ледников.

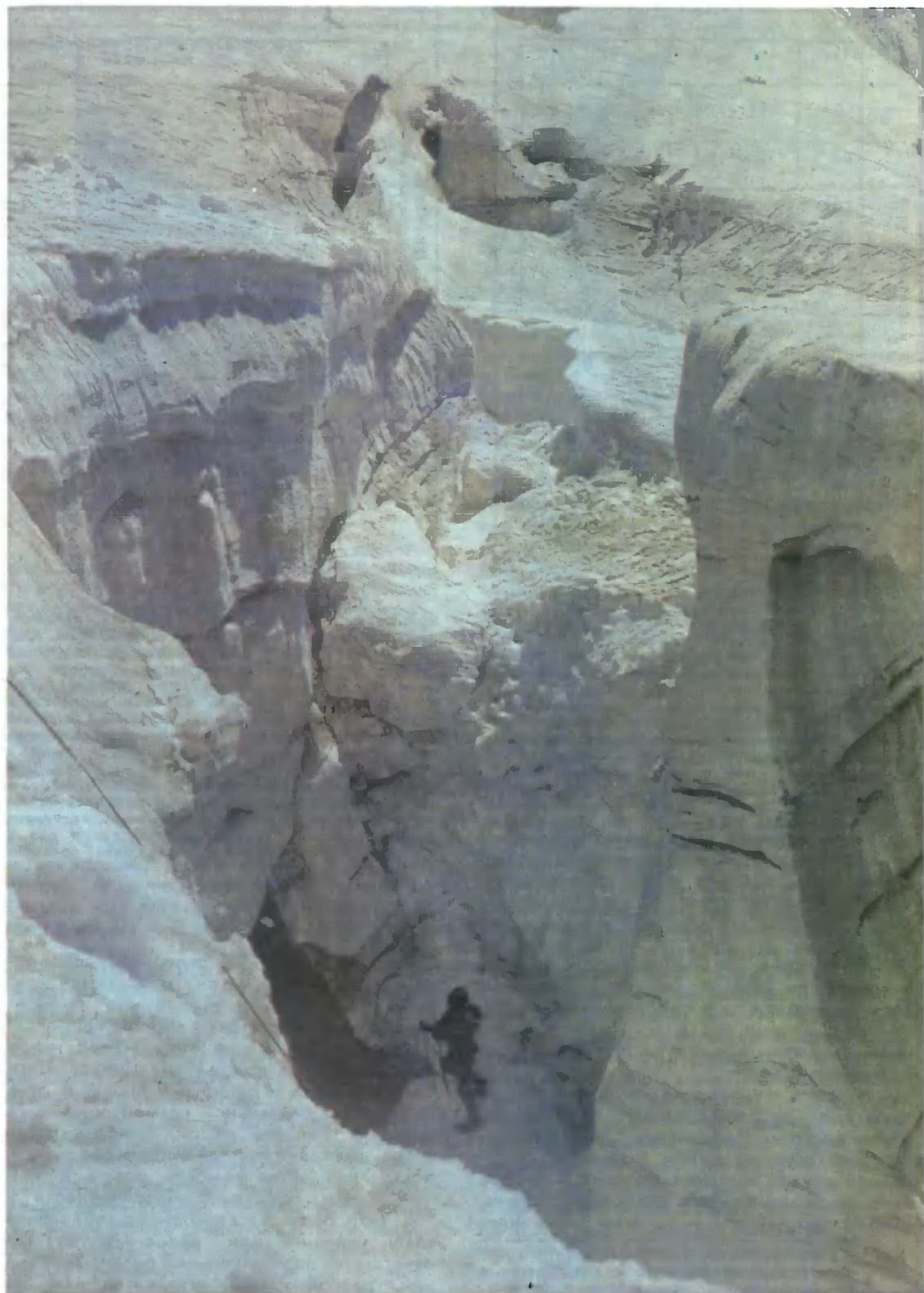
В обычном речном, равнинном, бассейне составляющая стока от таяния снега приурочена к весеннему периоду (с ним связано весеннее половодье), а затем сток обеспечивают такие его составляющие, как дождевые или грунтовые воды.

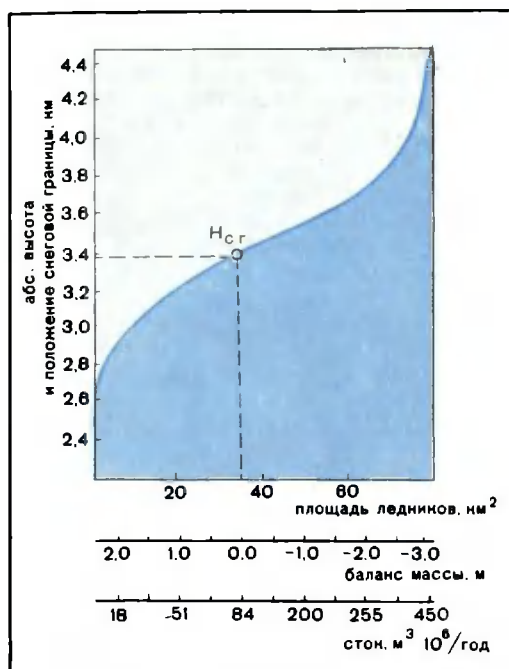
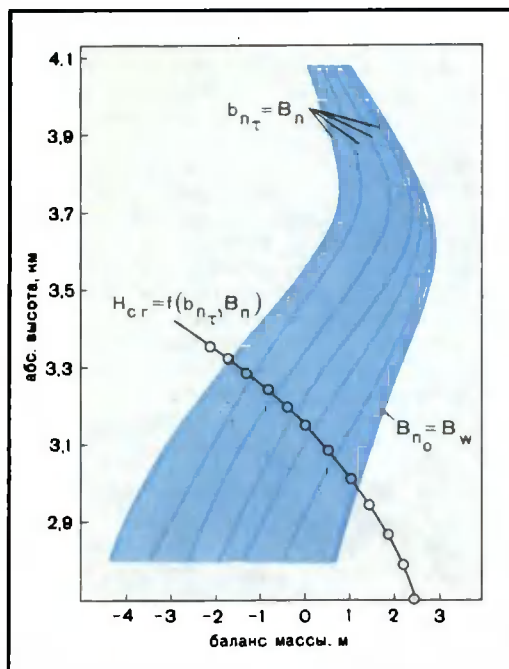
Ледник же (его можно рассматривать как речной бассейн) показывает необычную картину: объем стока почти полностью определяется таянием снега, фирна и льда, т. е. сток формируется одним источником (атмосферные осадки в летнее время выпадают преимущественно в твердом виде).

Значит, остается найти удобный способ слежения за поступлением воды из ледника в русло вытекающей реки. По отношению к ледникам природа предусмотрела удивительный маркирующий показатель состояния баланса массы ледника и стока. Это так называемая снеговая граница. В конце периода таяния, поздней осенью эта видимая граница разделяет поверхность ледника на две области. Первая — область прихода массы, или положительного баланса; там лежит снег, выпавший за предыдущую зиму и не растаявший за лето. Вторая — область расхода массы, или отрицательного баланса. Соотношение накопившейся массы и отданной ледником в результате стока воды и дает баланс всего ледника. На самой же высоте снеговой границы баланс всегда равен нулю, и граница эта прекрасно видна с любого расстояния, поскольку разделяет более яркий чистый снег в области прихода и нижележащий многолетний фирн и лед в области расхода. В сухие и теплые периоды снеговая граница расположена на поверхности ледника выше, а в холодные — ниже обычного. Фиксируя крайнее верхнее состояние высоты снеговой границы в конце каждого балансового года, можно построить для ледника зависимость высоты снеговой границы от баланса массы. Так обычно и делалось в гляциологии. Однако, чтобы построить кривую этой зависимости, опять нужны многолетние наблюдения.

А если не ждать конца периода таяния, а регистрировать все множество положений высоты снеговой границы в ее поступательном продвижении от самой нижней точки ледника, освобождающейся

Мощные слои снега, накапливающиеся за год в областях питания горных ледников. Масса годовых слоев составляет приходную статью баланса массы ледников.





Состояние баланса массы ледника ($b_{n\tau}$) и соответствующие ему высоты снеговой границы $H_{сг}$. Снеговая граница, продвигаясь вверх по леднику, делит его поверхность на область положительного и отрицательного баланса массы, на каждую дату измерений. Такие реализации баланса массы представлены как функции абсолютной высоты, поскольку именно с ней связаны пространственные изменения прихода, расхода массы и ледникового стока. Крайняя правая кривая показывает максимальную массу ледника B_n в текущем году. Она же определяет зимний баланс B_w (аккумуляция снега на леднике за зиму). По всем парам измеренных величин $H_{сг}$ и $b_{n\tau}$ строится зависимость $H_{сг} = f(b_{n\tau}, B_n)$, которая остается неизменной в многолетии до тех пор, пока ледник сохраняет неизменными свои размеры и форму.

весной от снега, до максимального уровня высоты, где она остановится осенью? Тогда, измеряя в те же сроки баланс массы ледника и стока воды, получаем практически весь возможный в многолетии набор их значений⁶.

Теперь можно построить кривую зависимости высоты снеговой границы от баланса массы. Дальнейшая схема прогноза представляется делом техники. С полученной кривой снимаем текущие значения баланса через каждые несколько метров абсолютной высоты, и по этим значениям

⁶ Справедливо для условий аномально высокого положения высоты снеговой границы и соответствующего отрицательного баланса.

Интегральное распределение площади ледников системы долины р. Баксан на Центральном Кавказе представлено в виде гипсометрической кривой. По положению на ней высоты снеговой границы $H_{сг}$ определяется состояние баланса массы B_n всей системы ледников и объем ледникового стока за год. Равновесному состоянию ледников системы ($B_n = 0$) соответствует высота снеговой границы 3,38 км над ур. м. (штриховая линия) и объем ледникового стока 84 млн м^3 в год. При отрицательном балансе массы, например один раз в 100 лет, объем годового стока с ледников составит 450 млн м^3 . Для случая аномально холодного и снежного года, повторяемость также раз в сто лет, объем годового стока едва превысит 1 млн м^3 .

строим интегральную функцию распределения. В гидрологии они называются кривыми обеспеченности. Обычно эмпирические точки достаточно хорошо аппроксимируются кривыми некоторых вероятностных законов распределения (Гаусса, Пирсона, Гумбеля, Крицкого-Менкеля и др.). С аппроксимированной кривой снимаются значения баланса массы и ледникового стока, имеющие определенную обеспеченность, или встречаемость раз в n лет.

Таким образом, обеспеченности в 1 % (что означает вероятность появления такой величины один раз в сто лет) соответствует положительный баланс 2400 мм или, равновероятно, отрицательный ба-

Вероятностный прогноз баланса массы и стока с ледника Джанкуат

Обеспеченность, или встречаемость, раз в п лет, %	1	5	10	20	50
Баланс массы, мм	2400; —3200	1720; —2320	1240; —1910	660; —1330	—340
Объем стока, м ³ · 10 ⁶	0; 16,8	2,1; 14,2	3,5; 12,9	5,2; 11,2	8,0

ланс — 3200 мм. Обеспеченности 50 % (встречаемость один раз в два года) соответствует отрицательный баланс массы — 340 мм. Это означает, что современные условия неблагоприятны для ледника и он в среднем нестационарен, отстывает, при этом сток составляет 8 млн м³. Замечу, что если бы ледник был стационарен, т. е. баланс его массы был равен нулю, то сток составил бы 7 млн м³. Значит, в современных условиях ледник отдает в среднем из своих многолетних запасов 1 млн м³ воды в год.

ОТ ЛЕДНИКА К СИСТЕМЕ

Перенос свойств с одного изученного природного объекта на их совокупность всегда представляет сложную проблему. Действительно, все ледники разные. Каждый не изучишь, и потому надо искать общие черты.

В одном горноледниковом районе располагаются ледники самых различных типов и размеров: крупные дендритовые, сложно-долинные и просто-долинные, и совсем маленькие, каровые, висячие и т. д.

Каждому, однако, соответствует определенная высотная ступень; малые ледники не могут опускаться до днщ горных долин, а прячутся наверху и занимают интервал высот всего в несколько сотен метров. А крупные, такие как Безенги на Кавказе или Фортамбек на Памире, стекают с самых высоких вершин, и их широкие, как реки, языки текут далеко по просторным долинам. Перепад высот, в котором расположено тело таких ледников, нередко превышает 3 км.

Вообще высота и площадь оледенения являются двумя главными аргументами, определяющими интенсивность и объем ледникового стока.

Все площади отдельных ледников горного района можно представить интегрально распределенными по абсолютной высоте в виде так называемой гипсометрической кривой. В таком представлении видно общее свойство системы ледников, присущее только этому горноледниковому району. Отличительной особен-

ностью является форма гипсометрической кривой. Так мы «оторвались» от индивидуальных особенностей каждого из множества ледников, а посмотрели на всю систему сразу. Представим далее, что по гипсометрической кривой снизу вверх движется снеговая линия. Каждому ее положению (оно соответствует средней высоте в системе ледников) соответствует значение баланса массы и ледникового стока системы. Опорный ледник системы, как, например, Джанкуат для оледенения долины реки Баксан, как раз и покажет то вероятное значение баланса и стока, которому соответствует указанная высота снеговой границы. Опорный ледник — определитель системы.

Гляциологический прогноз ледникового стока дает представление о вероятности появления некоторой величины вне зависимости от метеорологического прогноза.

Однако если для ледниковой системы известен диапазон изменения баланса массы по опорному леднику, то от вероятностного прогноза можно перейти к детерминированному. Достаточно иметь аэро- или космический снимок ледниковой системы. Определенная по снимку средняя высота снеговой границы покажет соответствующее значение баланса массы и ледникового стока.

Расчеты показывают, что при современных темпах расхода массы ледников их хватит, в конкретном примере, на 150—200 лет. При этом объем стока будет быстро сокращаться.

На самом деле все произойдет в зависимости от направленности климатических изменений. А приведенные цифры говорят о другом. Ледники представляются нам чем-то вечным и незыблемым, как сами горы. И потому с трудом верится, что для их исчезновения совсем не нужно какого-то мощного воздействия, например сильного потепления. Оказывается, достаточно, чтобы столбик ртути в капилляре термометра устойчиво закрепился выше своего обычного уровня всего на одно маленькое деление. А в этом может быть повинен и человек.

Внеядерные геномы высших растений

В. И. Негрук



Валентин Ильич Негрук, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института физиологии растений им. К. А. Тимирязева АН СССР. Основные научные интересы связаны с изучением митохондриальных геномов высших растений.

Характер фундаментальных исследований в биологии в последние двадцать лет коренным образом изменился и продолжает совершенствоваться благодаря развитию методов изучения молекулярных процессов, а также геной и клеточной инженерии. Судя по темпам нынешних исследований, в ближайшие десятилетия в науках о живых организмах будет сделан гигантский шаг, значение которого можно сравнить лишь с достижениями современной физики.

В настоящее время во всем мире интенсивно ведутся работы в одном из многообещающих направлений молекулярной биологии — изучается структура и функционирование ДНК, заключенной в клеточных органеллах высших растений — митохондриях и хлоропластах. Разрабатывается и совершенно новая область: исследователи изучают механизм взаимодействия между тремя основными геномами растительной клетки — ядерным, хлоропластным и митохондриальным. Большие надежды возлагаются на то, что результаты этих исследований можно будет применить в растениеводстве. В расчете на возможность в будущем повысить урожайность сельскохозяйственных растений и выбираются подопытные объекты: в основном это хозяйственно полезные виды

растений — пшеница, кукуруза, соя, различные бобовые культуры и т. д.

До сих пор успех в выведении высокоурожайных сортов и даже новых, не существующих в природе видов растений зависел от генетиков и селекционеров, которые основывали свою работу на всеобщей для живой природы закономерности — наследственной передаче признаков от предков к потомкам через ДНК ядра. Однако сейчас начинает выясняться, что немалая роль в жизни растительной клетки принадлежит внеядерной наследственности.

Первые представления о существовании в клетках эукариот наследственности, не связанной с ядром, появились еще в начале XX в., а к концу 30-х годов эти представления приобрели солидную генетическую основу. Тем не менее природа внеядерной наследственности стала понятной лишь к середине 60-х годов после того, как выяснилось, что хлоропласты и митохондрии ядерных организмов содержат свои собственные специфические только для них, молекулы ДНК. С этой поры геномы хлоропластов и митохондрий различных эукариот, в том числе высших растений, стали объектами исследований молекулярных биологов.

Бурное развитие этого направления

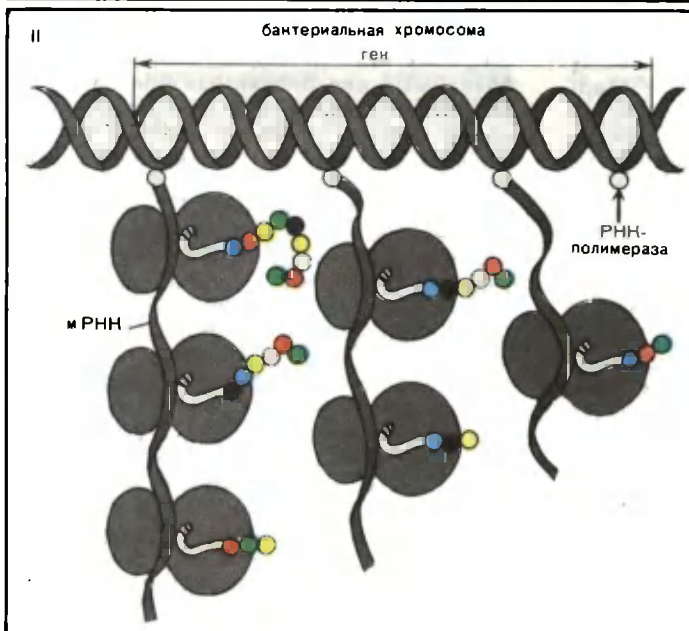
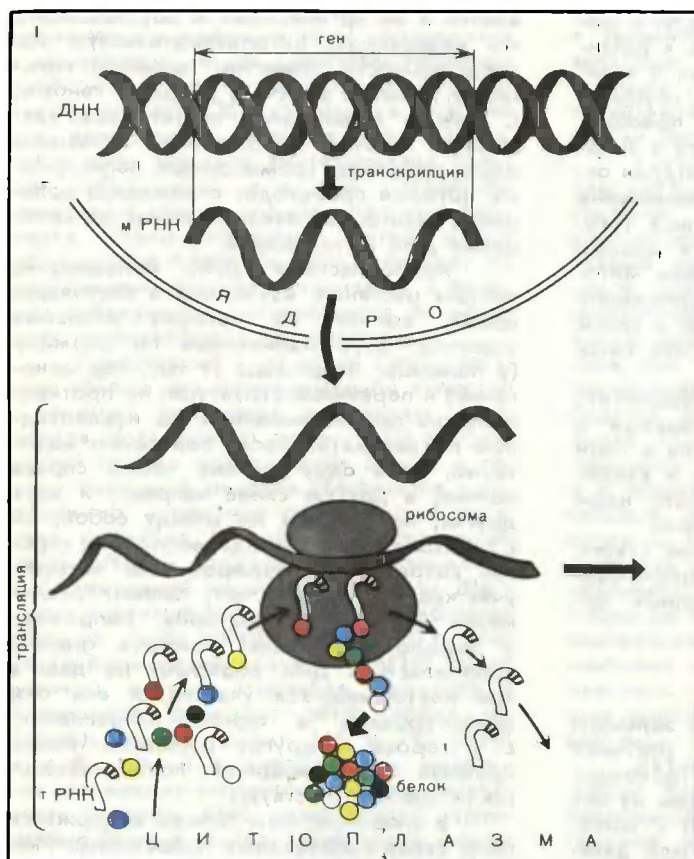


Схема биосинтеза белка у эукариот (I) и прокариот (II).

У эукариот первая стадия биосинтеза — транскрипция (считывание нуклеотидной последовательности структурного гена в молекуле ДНК в последовательность матричной РНК, мРНК) — осуществляется в клеточном ядре.

Следующая стадия — трансляция (перевод последовательности нуклеотидов в последовательность аминокислот) — происходит в цитоплазме: образовавшаяся мРНК поступает в рибосому — органеллу, где непосредственно осуществляется синтез белка.

В «щели» между частицами рибосомы во время трансляции располагается мРНК, и к ее определенному кодону (последовательности из трех нуклеотидов) подходит транспортная РНК (тРНК), несущая аминокислоту, и соединяется с ним; и следующему, соседнему участку мРНК присоединяется другая тРНК с другой аминокислотой (они обозначены разноцветными кружками) и т. д., пока не будет считана вся цепочка мРНК; только тогда все аминокислоты белка, запрограммированного в соответствующем структурном гене, оказываются соединенными между собой в единую полипептидную цепочку; тРНК, доставившая аминокислоту в рибосому, освобождается и может снова доставить к месту синтеза ту же самую аминокислоту.

У бактерий (безъядерных, или прокариотических, организмов) весь генетический аппарат которых представлен одной хромосомой, и транскрипция и трансляция идут одновременно. На матрице бактериальной ДНК с помощью РНК-полимеразы (фермента, катализирующего транскрипцию ДНК в мРНК) происходит синтез мРНК. Ее нити, расположенные перпендикулярно к линейной молекуле ДНК, продвигаются вдоль матрицы и увеличиваются в длину. По мере удлинения нитей мРНК к ним присоединяются рибосомы (они тоже перемещаются вдоль нити РНК по направлению к ДНК) и на них идет синтез белковой молекулы.

неудивительно, так как хлоропласты и митохондрии играют большую роль в растительных клетках, а следовательно, и в целых растениях: в хлоропластах осуществляется фотосинтез — процесс преобразования энергии солнечного света в энергию химических связей, а митохондрии отвечают за энергетическое обеспечение внутриклеточных процессов. Кроме того, в последнее время появляются данные о способности хлоропластного или митохондриального геномов обуславливать устойчивость растительных клеток к таким ядовитым химическим агентам, как патотоксины¹.

Задача этой статьи — познакомить читателей с научными достижениями в исследовании внеядерных геномов и теми гипотезами о ДНК митохондрий и хлоропластов, которые могут обогатить наши представления о биологии растений.

Чтобы облегчить чтение этой статьи, предлагаем общую схему биосинтеза белка в прокариотических и ядерных организмах.

ГЕНОМ ХЛОРОПЛАСТОВ

В среднем в одной клетке зеленого листа (в зависимости от вида растения и возраста листа) содержится несколько десятков хлоропластов, а в каждом из них почти столько же молекул ДНК с молекулярным весом от 80 до 120 млн дальтон. Значит, вся ДНК хлоропластов представлена несколькими сотнями копий, т. е. ее общее количество близко количеству ядерной ДНК. Однако в отличие от ядерного генома, содержащего как уникальные гены, так и гены, повторяющиеся от нескольких раз до десятков тысяч раз, не менее 90—95 % генома хлоропластов составляет популяция одинаковых кольцевых молекул.

Кольцевым молекулам ДНК, которые могут самостоятельно размножаться в эвкариотной клетке, сейчас придается большое значение. Дело в том, что кольцевой структурой они напоминают бактериальные плазмиды, способные привносить искусственно встроенные в них участки чужеродной ДНК (на этом основан метод генной инженерии). Возможно, что кольцевые ДНК могут быть «переносчиками» генетического материала между ядром

клетки и ее органеллами и обуславливать так называемую цитоплазматическую наследственность. Известны примеры кольцевых молекул ДНК и в ядерном геноме. С такими кольцевыми структурами связывают некоторые изменения в геноме ядра, например хромосомные перестройки, которые происходят с помощью кольцевых хромосом, очень похожих на кольцевые ДНК митохондрий.

Хлоропластные ДНК большинства высших растений, изученных в настоящее время, состоят из четырех основных участков: двух одинаковых по размеру (у пшеницы, например, 21 тыс. пар оснований) и первичной структуре, но противоположно ориентированных (их нуклеотидные последовательности полностью идентичны, если одну из них читать справа налево, а другую слева направо) и двух других, не сходных ни между собой, ни с первыми двумя. Правда, абсолютно строгой сохранности размеров всех четырех участков у растений нет, бывают отклонения и от числа повторов. Например, у водоросли эвглены (*Euglena gracilis*) хлоропластная ДНК содержит не два, а три повторяющихся участка, и все они ориентированы в одном направлении, а у гороха и других кормовых бобов крупные повторяющиеся последовательности вовсе отсутствуют.

В хлоропластном геноме содержатся гены своих собственных рибосомных РНК (рРНК; 16S, 23S и 5S, в таком порядке они расположены в кольцевой ДНК) и транспортных РНК (тРНК), т. е. молекул, необходимых для биосинтеза белков (рРНК являются составной частью рибосом — белковых фабрик, тРНК — это как бы извозчики, доставляющие аминокислоты к таким фабрикам). Самих же белков, синтезируемых с хлоропластной ДНК, обнаружено довольно много, причем функция установлена только для нескольких. Зачем хлоропластам нужны другие выявленные в них белки (их около 80), предстоит еще узнать. Среди немногих белков с установленной функцией особенно интересна и хорошо изучена 1,5-рибулозодифосфаткарбоксилаза (РДФК) — специфичный для хлоропластов фермент. Его генетический контроль являет собой яркий пример тесного взаимодействия ядерного и хлоропластного геномов.

РДФК состоит из двух субъединиц — большой и малой, причем информация о синтезе большой субъединицы закодирована в геноме хлоропластов, а малой — в ядре. Матричная РНК (мРНК) малой

¹ Патотоксины — природные органические соединения, выделяемые болезнетворными для растений грибами или микроорганизмами.

субъединицы РДФК считается с соответствующего ядерного гена, переносится в цитоплазму, и на цитоплазматических рибосомах осуществляется биосинтез полипептидной цепи. Образовавшийся полипептид переносится затем в хлоропласты, где к тому времени синтезирована большая субъединица, и в этих органеллах происходит сборка полной молекулы фермента. Таким образом, синтез малой субъединицы РДФК хлоропластов идет по типу эукариотических организмов, а большая субъединица синтезируется по принципу, свойственному прокариотам.

Удивительно в строении хлоропластного генома его одновременное сходство с геномом прокариот и ядерных организмов. Большинство структурных особенностей генома хлоропластов ближе к геному кишечной палочки (*Escherichia coli*). Например, в геномах растительных органелл и клеток *E. coli* одинаково число генов рРНК и порядок их расположения в нуклеотидной последовательности ДНК; много структурного сходства в некоторых участках генов рРНК (около 70 % последовательностей 16S и 23S рРНК гомологичны, похожи вторичная структура и 3'-концевой фрагмент рРНК обоих геномов); между генами 16S и 23S рРНК и у *E. coli*, и в хлоропластах имеется так называемая спейсерная последовательность (участок ДНК, включающий структурные гены и последовательности между ними, иногда очень крупные, назначение которых не установлено), содержащая гены некоторых тРНК (у кукурузы, например, это гены изолейциновой и аланиновой тРНК, расположенные, к тому же, в одинаковом с *E. coli* порядке).

Другие структурные черты хлоропластного генома роднят его с эукариотическими геномами. Так, гены изолейциновой и аланиновой тРНК не представляют собой единой смысловой последовательности, а содержат несчитываемые в белковую структуру участки (интроны), гораздо большие, чем сами гены тРНК.

Таким образом, если размеры и порядок расположения генов рРНК хлоропластного генома сближают его с прокариотическими геномами, то наличие интронов в генах тРНК и самой спейсерной последовательности свидетельствует о признаках, характерных для геномов эукариот.

Если вспомнить, что происхождение растительных органелл, по одной из гипотез, связывают с внутриклеточными бактериями-симбионтами, то такое сход-

ство генома хлоропластов с геномами про- и эукариот вполне понятно: в процессе эволюции неминуемо должна была происходить передача многих генов от бактериальной клетки-предшественницы в клетки растений-хозяев.

Говоря о сходстве структур хлоропластного генома различных видов высших растений, нельзя не упомянуть о его количественной стороне, сказать, насколько похожи их нуклеотидные последовательности, поскольку структурная гомология генетического материала важна для понимания эволюционных процессов. Оказалось, что гомологичных (консервативных) последовательностей у таких далеких по родству видов, как кукуруза и горох, около 33—34 %, причем эти последовательности разбросаны по всему геному и в основном невелики по размеру. Остальные участки полинуклеотидной цепочки в геноме хлоропластов кукурузы и гороха различны. Именно эти участки указывают на эволюционные изменения в хлоропластных геномах и определяют их видовую специфичность. Но даже и такие наиболее консервативные области хлоропластных геномов, как участки, содержащие группу рибосомных генов, все же подверглись эволюционным перестройкам.

На каком же таксономическом уровне можно заметить происшедшие когда-то эволюционные изменения хлоропластных геномов и каковы механизмы этих изменений? Судя по имеющимся экспериментальным данным, заметные перестройки геномов хлоропластов выявляются на видовом уровне. Причины же их — не только точечные мутации, но и выщепление-встраивание фрагментов ДНК, содержащих иногда несколько сот пар нуклеотидов. Если большие куски ДНК выщепляются из одного ее участка и встраиваются в другой, это, безусловно, может изменить работу как окружающих такой участок структурных генов, так и генов внутри него самого. Видимо, выщепления-встраивания приводили в дальнейшем к заметным морфологическим и анатомическим различиям растений, хотя сами переместившиеся участки ДНК оставались гомологичными. Вероятно, поэтому хлоропластные геномы кукурузы и гороха, видов, эволюционно отдаленных друг от друга, имеют сходство в строении.

Но только ли другие области собственного генома могли быть источником для встраивания или выщепления, или какие-то совершенно чуждые геномы тоже способны поставлять наследственный ма-

Размер митохондриальных ДНК

Виды животных и растений	Длина кольцевых молекул (по данным электронной микроскопии), мкм*	Размер геномов (по данным рест- риктозного анализа), тыс. пар оснований
Разные виды дрозофилы	5—6,2	15—18,5
Млекопитающие	4,7—5,5	14—16,5
Дрожжи	21—25	70
Кукуруза	30; 22; 16; 0,8; 0,6; 0,5; 0,47	420**

* 1 мкм равен приблизительно 3,1 тыс. пар оснований.

** Несоответствие размера митохондриального генома кукурузы, определенного двумя методами, обусловлено наличием гетерогенных по длине и структуре кольцевых молекул.

териал для перестроек генома? А может быть, геномы других органелл одной и той же клетки тоже непосредственные участники подобного обмена? Обо всем этом сейчас высказываются разные предположения. На наш взгляд, наиболее интересна гипотеза о возможности межорганелльного обмена фрагментами ДНК, например между хлоропластами и митохондриями или митохондриями и ядром клетки. Эта гипотеза привлекательна тем, что уже имеет подтверждающие данные (правда, их немного); наметились и дальнейшие экспериментальные подходы, необходимые для ее проверки. Но прежде чем проанализировать гипотетическое взаимодействие геномов клеточных органелл, познакомимся с современными представлениями о структурной организации геномов других органелл высших растений — митохондрий.

ГЕНОМЫ МИТОХОНДРИЙ

Структурная организация митохондриальных и хлоропластных геномов высших растений существенно различна. Если к настоящему времени достаточно твердо установлено, что геномы хлоропластов представлены популяцией кольцевых молекул ДНК, то в отношении митохондриальных геномов такой уверенности нет. Большинство исследователей обнаруживают в препаратах ДНК митохондрий не менее 95 % линейных молекул, хотя иногда из некоторых растений удается выделить препараты, содержащие до 45 % кольцевых структур.

Таким аномалиям найдено объяснение. Сейчас доминирует точка зрения, что митохондриальный геном исходно представлен кольцевыми молекулами, а линей-

ные ДНК образуются из кольцевых в результате их неспецифического расщепления ферментами во время выделения препаратов. Сопоставление данных электронной микроскопии и результатов, полученных при изучении структуры фрагментов, выделенных с помощью ферментов рестриктаз, также приводит к выводу, что геномы митохондрий состоят из популяций кольцевых молекул ДНК, сильно различающихся размером. Подтверждением гетерогенности кольцеобразных структур митохондриальной ДНК служит и то, что сумма молекулярных масс рестрикционных фрагментов ДНК в несколько раз превышает размер самых крупных кольцевых ДНК, которые обычно удается обнаружить в митохондриях (см. табл.).

Все эти экспериментальные данные позволяют предположить, что митохондриальный геном растений — тоже набор кольцевых хромосом, однако в отличие от хлоропластного генома каждая из них несет уникальные гены и содержит значительное количество некодирующей ДНК. В популяции такие кольцевые молекулы отличаются друг от друга не только размерами, но и первичной структурой. Пока это предположение не нашло подтверждения в структуре геномов всех исследованных растений, но создатели гипотезы кольцевых хромосом — К. Левингс и Д. Принг — обнаружили дискретные классы кольцевых ДНК в митохондриях кукурузы. Примечательно, что суммарный вес всех кольцевых молекул соответствует размеру полного митохондриального генома. Наши собственные данные также подтверждают гипотезу Левингса и Принга: в митохондриальной ДНК кормовых бобов в электронном микроскопе обнаружены крупные кольцевые ДНК и более мелкие,

тоже замкнутые в кольцо молекулы, характерные для большинства изученных митохондриальных геномов высших растений².

В последнее время составляются физические карты (схематически изображаются положение участков молекулы ДНК, полученных при расщеплении полной ДНК различными по специфичности рестриктазами) митохондриального генома кукурузы. Пока эти исследования не завершены, но похоже, что все последовательности митохондриальной ДНК можно выстроить в одну непрерывную цепочку, разрезав кольцевые молекулы и соединив их между собой. Это не только не противоречило бы гипотезе кольцевых хромосом, но подтверждало бы ее, если бы в экспериментах удалось найти кроме уникальных последовательностей ДНК еще и перекрывающиеся участки.

К настоящему времени детальнее всех других исследованы митохондриальные ДНК кукурузы и пшеницы, и в них также найдено сходство с геномами других организмов. Например, содержащиеся в митохондриях пшеницы гены 26S, 18S и 5S рРНК, как в хлоропластах и *E. coli*, разделены спейсерными последовательностями. А порядок расположения этих генов в митохондриальном геноме пшеницы уникален, т. е. отличается от изученных ныне геномов прокариотических организмов, эвкариот и хлоропластов.

В первичной же структуре самих рибосомных РНК одни участки сходны с рРНК бактерий, другие гомологичны рРНК эвкариот, а третьи — уникальны. Общее свойство митохондриального генома пшеницы с прокариотическим и хлоропластным — разбросанность генов тРНК по всему геному.

Буквально до самого последнего времени геном митохондрий высших растений был белым пятном в молекулярной биологии. Нынешние исследования этих геномов находятся лишь в начальной стадии, а потому конкретные сведения фрагментарны. Но даже и в такой ситуации некоторые данные о строении митохондриального генома растений позволяют усмотреть его изменчивость и наметить механизмы этой изменчивости. Приведем один такой пример.

В геноме митохондрий пшеницы есть два фрагмента ДНК — один в 6,2 тыс. пар

оснований, другой в 5,5, которые содержат последовательности генов 18S и 5S рРНК, а также генов некоторых тРНК. Их особенность в том, что структура второго фрагмента полностью повторяется в первом, а различия в размерах обусловлено вставкой из 700 нуклеотидов. Этот факт говорит в пользу выщепления-встраивания фрагментов ДНК как одного из механизмов, формирующих митохондриальный геном. Если подобные перемещения будут обнаружены и у других растений, гипотеза о способности отдельных элементов генома менять свое место превратится в реальность и станет понятно, почему митохондриальный геном высших растений сложнее хлоропластного: по-видимому, выщепление-встраивание — событие гораздо более частое в митохондриях, чем в хлоропластах.

ОБМЕНЯЮТСЯ ЛИ КЛЕТОЧНЫЕ ОРГАНЕЛЛЫ ЭЛЕМЕНТАМИ ГЕНОМОВ?

Детальный анализ митохондриальных геномов зависит не только от методов структурной химии нуклеиновых кислот, белков, генной инженерии, но также и от наличия генетических маркеров (участков ДНК с установленной функцией или последовательностью), которых, к сожалению, очень мало. А именно с их помощью уже сейчас получены важные результаты, позволяющие судить о сходстве и различиях генома митохондрий из высших растений с геномами других органелл. По таким сравнительным данным можно было бы понять, насколько реальны передвижения отдельных элементов генома из одной органеллы в другую. Сейчас только один достоверный факт прямо подтверждает эту мысль. Р. Райт и Д. Куммингс обнаружили, что гены субъединиц I и III оксидазы цитохрома *c*, локализованные в митохондриальном геноме *Podospira anserina*, внедряются в ядерный геном в течение одного жизненного цикла гриба³. Происходит это в конце цикла развития подоспоры при посредстве линейных плазмид и, по мнению исследователей, связано со старением. Перенос генов подоспоры из митохондрий в ядро — первый прямой пример передвижений генетических элементов не внутри, а между геномами в пределах одной клетки. К тому же, это

² Eisner G. I., Negrut V. I. et al. — FEBS, 1984, v. 97, p. 139.

³ Wright R. M., Cummings D. J. — Nature, 1983, v. 302, p. 86.

событие не из числа тех, которыми можно объяснить давние эволюционные перестройки, оно происходит буквально на глазах.

Правда, подобный обмен элементами генома между митохондриями и ядром известен и для дрожжей, но расценивается он обычно несколько по-иному. В клетках дрожжей синтез всех субъединиц (кроме девятой) фермента АТФ-азы закодирован в ядерной ДНК, и только девятая синтезируется в самих митохондриях. Такое различие в месте синтеза, а значит, и в положении гена девятой субъединицы, исследователи объясняли давним и редким перемещением этого гена из бактериального предка митохондрий в ядро. Считалось, что переместившийся ген в силу какого-то эволюционного преимущества «застрял» в ядерном геноме, и в результате у некоторых более высокоорганизованных, по сравнению с дрожжами, организмов и у низшего гриба *Neurospora crassa* весь АТФ-азный комплекс кодируется ядерной ДНК.

Возможность перемещений генов у высших растений пока строго не доказана, но ее нельзя отрицать, имея пример *P. anserina*. Обмен генетической информацией подтверждают пока только косвенные факты, а именно: наличие в митохондриях растений кандидатов на роль «переносчиков генов» — плазмидоподобных кольцевых или линейных ДНК. Такие ДНК найдены в митохондриях кукурузы, сорго, сахарной свеклы, фасоли, табака, разных видов рода *Brassica*⁴. Мы обнаружили миникольцевые ДНК в митохондриях кормовых бобов и еще двух видов семейства бобовых — черной вики и люцерны⁵. В каждом из этих растений спектр плазмидоподобных ДНК оказался видоспецифичным.

Функция большинства таких ДНК неясна. Сейчас есть лишь предположение о связи плазмидоподобных ДНК митохондрий с давно известным признаком кукурузы — цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС)⁶. В митохондриях



Электронная микрофотография митохондриального генома гороха.

Видна крупная кольцевая молекула ДНК и несколько мелких (указаны белыми стрелками). Плазмидные ДНК известного размера (показаны цветными стрелками) использованы как масштаб для измерения исследуемых миникольцевых молекул.

растений с этим признаком (известно несколько типов ЦМС, речь идет только о S-типе) есть небольшие линейные молекулы ДНК — S_1 и S_2 , а у нормальной, дикой формы кукурузы эти последовательности встроены в основную митохондриальную ДНК. Напрашивается вывод, что гены, содержащиеся в S_1 и S_2 , выщепляются и встраиваются внутри митохондриального генома.

Насколько правдоподобно предположение о перемещении генов внутри митохондриального генома, а тем более между геномами органелл высших растений, и переносят ли их плазмидоподобные кольцевые ДНК, покажут будущие исследования. Однако уже известные факты могут служить подтверждением межорганелльного взаимодействия геномов. Один из таких фактов — заметная гомология хлоропласт-

⁴ Palmer J. D., Shields C. R. et al. — Ibid., v. 301, p. 725.

⁵ Негрук В. И., Черны Д. И. et al. — FEBS Lett., 1982, v. 142, p. 115; Nikirova I. D., Nегрук V. I. — Planta, 1983, v. 157, p. 81.

⁶ Цитоплазматическая мужская стерильность — неспособность пыльца к нормальному функционированию. Обусловлена она генетическими факторами, находящимися в цитоплазме, и возникает самопроизвольно,

но в очень редких случаях. Селекционеры специально выводят линии кукурузы с этим признаком, чтобы при получении межлинейных гибридов, которые за счет гетерозиса дают высокий урожай, избежать нежелательного самоопыления растений.

ных и митохондриальных геномов (в геноме митохондрий, например, содержится ген 16S рРНК хлоропластов и гены изолейциновой и валиновой тРНК).

Зачем нужно клетке внедрение хлоропластных генов в митохондриальный геном, неясно, но несомненно, что гомологичные последовательности могли возникнуть лишь в результате генетического обмена между геномами этих органелл. Осуществляется ли этот обмен через генетическую рекомбинацию или является результатом перемещения мобильных генетических элементов, тоже пока не установлено.

Говоря об эволюционных перестройках внутри ядерного, хлоропластного и митохондриального геномов растений, необходимо помнить, что это направление исследований только начинает развиваться. Что возможен внутригеномный обмен, доказывают многочисленные работы по изучению мобильных диспергированных генов⁷. Источником же чужеродной генетической информации могут быть вирусные геномы, и это уже непреложный факт. О возможности перемещений генетических элементов между геномами внутри одной клетки свидетельствуют: миграция плазмидоподобных ДНК из митохондриального генома в ядерный в клетках низшего гриба *P. anserina* и гомология участка митохондриального и хлоропластного геномов кукурузы.

Если исходить даже из далеко не полных сведений (а здесь из их числа приведены лишь немногие) о структуре геномов органелл высших растений, их клетки необходимо считать средоточием равноценных по важности трех генетических систем — ядерной, хлоропластной и митохондриальной. Жизнь и работа растительных клеток определяется взаимодействием этих геномов, которое, по-видимому, координируется различными метаболитами, белками и, быть может, низкомолекулярными РНК. Слаженным действием геномов в индивидуальном развитии растения и обеспечиваются, вероятно, нормальные жизненные процессы, уравнивающиеся их отклонения в ответ на умеренные внешние воздействия. При этом не исключено, что в некоторых случаях нормальное функционирование растительных клеток контролируется и перемещением мобильных генетических

элементов из одной органеллы в другую подобно тому, как это происходит у низшего гриба *P. anserina*.

Естествен глубокий академический интерес к строению геномов растительных органелл: именно фундаментальные исследования в этой области помогут объяснить в будущем различные онтогенетические изменения и общие эволюционные идеи. К тому же, знание структуры растительных органелл и механизма их функционирования должно послужить основой и в прикладном аспекте. Исследователями высказывается мысль о возможности повысить урожайность сельскохозяйственных растений, используя достижения молекулярной биологии.

Чего же можно ожидать в будущем от приобретенных знаний о структуре и работе геномов хлоропластов и митохондрий? Конечно, мечты связаны с усилением тех функций органелл, которые они осуществляют в клетке. Возможно, с помощью методов генной инженерии удастся повысить эффективность фотосинтеза в хлоропластах и заставить митохондрии вырабатывать больше энергии или перераспределять ее между клетками по нашему усмотрению.

Это касается, по-видимому, не столь близкого будущего, но есть уже и реальные точки приложения знаний, получаемых при исследовании внеядерных геномов. Например, получение линий растений с цитоплазматической мужской стерильностью, так необходимых в растениеводстве. Сейчас на основе таких линий, выведение которых связано с огромным трудом и затратами, получают межлинейные гибриды (кукурузы, огурцов и др.), обладающие гетерозисными свойствами. И наконец, если удастся найти и выделить гены хлоропластов (или митохондрий, пока неясно в каких органеллах они сосредоточены), ответственные за устойчивость к патотоксинам, то потом, опять-таки с помощью генной инженерии, можно вводить их в экономически ценные растения, подверженные грибковым заболеваниям.

Судя по тому, что исследователям удалось заставить некоторые микроорганизмы производить лекарственные препараты (например, грамицидин, интерферон) и перерабатывать нефть, мечта о повышении урожайности растений — не фантазия, а вполне реальная возможность. Надо лишь, чтобы не снижались темпы изучения геномов растений, в том числе внеядерных геномов.

⁷ Евгеньев М. Б. Гены, не знающие своего места. — Природа, 1984, № 2, с. 72.

Подземный сверхглубокий полигон — лаборатория будущего

Н. И. Хитаров



Николай Иванович Хитаров, член-корреспондент АН СССР, заведует лабораторией магматогенных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского. Специалист в области глубинных процессов. Награжден Золотой медалью им. В. И. Вернадского, лауреат премий им. В. И. Вернадского и А. Е. Ферсмана АН СССР. В «Природе» опубликовал статьи: Мысли о будущем геологической науки (1973, № 1); Основные перспективы развития геологии (1976, № 12); Твердые приливы и дегазация Земли (совместно с Г. И. Войтовым; 1982, № 4).

В последнюю четверть века наши знания о глубинах Земли существенно расширились. С помощью широкого комплекса геофизических исследований и бурения на континентах и на дне океана получены результаты, позволяющие перейти от общих представлений о глубоких зонах нашей планеты к более точным. Один из самых удачных экспериментов в этой области — первенец сверхглубоких — скважина на Кольском п-ове. Впервые советскими учеными получены данные о физико-химических и физических свойствах вещественного состава разреза, о геофизических особенностях в условиях, отвечающих различным уровням вплоть до глубины в двенадцать километров.

Небывалого прогресса в проходке этой скважины достигла техника бурения¹. Впереди у Кольского эксперимента — новые достижения.

Но несмотря на успехи в изучении глубин, приходится констатировать, что пока мы знаем о процессах, происходящих в глубоких недрах Земли, недопустимо мало. Геофизические и геохимические исследования слабо скоординированы, не си-

стематичны и для полноты представлений о состоянии недр нуждаются в расширении. Непосредственной деятельностью человека затронута самая верхняя оболочка планеты. Даже достигнув проектной глубины 15 км, Кольская сверхглубокая войдет в Землю лишь на 0,2 % ее радиуса. Между тем будущее человечества во многом связано с более совершенным знанием глубоких недр Земли, их минерально-сырьевых и энергетических ресурсов. Для познания глубинных процессов необходима информация, полученная непосредственно в теле Земли, на некоторой глубине. Одними только скважинами, где диаметр керна всего несколько сантиметров, здесь не обойтись. Необходимо создание на глубине подземного полигона-лаборатории, в которой, применяя прецизионный комплекс методов, можно проводить систематические режимные геофизические, геохимические, гидрогеологические, горно-технические и другие измерения по специально разработанной комплексной программе. О практической стороне дела, т. е. о возможностях создания такой лаборатории на глубине 5—6 км, речь пойдет дальше. Рассмотрим сначала проблемы теоретического и практического характера, к решению которых можно подойти с помощью подземного полигона.

¹ Резанов И. А. Сверхглубокое бурение. М.: Наука, 1981.

ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ

Очевидно, что изучать внутреннюю жизнь Земли наиболее выгодно на некоторой глубине, где уже сходит на нет влияние атмосферы, снижаются влияния подземных вод и техногенных факторов. Другими словами, на глубине может быть получена более «чистая» геофизическая и геохимическая информация, идущая из недр и связанная с особенностями протекания глубинных процессов.

Преимущества изучения внутренней жизни Земли на некоторой глубине можно сравнить с теми преимуществами, которые при решении астрономических задач дают измерения и наблюдения со спутников за пределами атмосферы.

В настоящее время существует немало крупных научных проблем, имеющих не только большое теоретическое, но и практическое значение, для решения которых необходимы исследования именно с уровня подземного полигона. Прежде всего — это проблема источников энергии недр, которыми определяется вся жизнь глубин. Среди них основными считают радиоактивный распад, гравитационную, приливно-отливную энергию, энергию химических реакций. Особую роль при этом отводят процессам радиоактивного распада. Важно расширить информацию об этом источнике энергии, изучая закономерности в изменениях газовой составляющей продукта распада радиоактивных веществ во времени. Особый интерес приобретает изучение этого процесса в связи с обнаружением естественного ядерного реактора на урановом месторождении Окло (Габон, Африка)². Установлено, что реактор действовал около 2 млрд лет назад в течение 500 тыс. лет. Урановые руды этого месторождения претерпевали ремобилизацию, протекающую с обогащением руд и одновременным удалением при этом части элементов, мешавших образованию природного атомного реактора. Созданные условия способствовали протеканию самоподдерживающихся ядерных реакций.

За время работы этого природного ядерного реактора в процесс расщепления было вовлечено около 500 т урана. Расщеплению подверглось 12 т ^{235}U и выделилось 100 млрд кВт·ч энергии. Боль-

шинство продуктов распада, за исключением газов — ксенона и криптона, практически остаются в зоне реактора, слабо проявляя миграционные способности.

Связывая с энергией распада радиоактивных веществ главный вклад в общий энергетический баланс недр, нужно вскрыть его долю, подойти к оценке других видов источников энергии, оценить тепловой поток с глубин, его выдержанность, выявить характер возможных изменений теплового потока во взаимосвязи с вариациями различных физических полей и геохимических показателей во времени. Влияние физических полей на процессы, происходящие в глубинах, чрезвычайно велико. Здесь важно изучать и отдельные виды полей, и взаимосвязь между полями различной природы. Например, взаимозависимость электромагнитного, гравитационного, теплового полей, поля механических напряжений и геохимических особенностей среды определяет общее состояние недр и различных их участков. Поэтому систематические измерения параметров состояния полей приведут к выявлению общих закономерностей глубинных процессов. Систематическому изучению должны подвергнуться и различные группы волн — сейсмические, акустические и др.

Необходимо расширить сбор данных об изменении состава флюидов — поступающих с глубин газов (CO_2 , CO , N_2 , H_2 и др.), способных отражать геохимические особенности протекания глубинных процессов. Например, в последнее время получены данные по геохимии редких газов различных петрологических объектов глубоких зон и связанных с ними ксенолитов — кусков пород, захваченных магмой при ее подъеме с глубин к поверхности. Они дают немало для расшифровки природных процессов и для суждения о составе мантии.

Важную информацию о глубинных процессах можно получить, изучая соотношение отдельных радиогенных и первичных пар изотопов газов, таких как ^3He , ^4He , ^{40}Ar — ^{39}Ar , ^{129}Xe — ^{130}Xe .

Так, газы из базальтов срединно-океанических хребтов характеризуются отношением концентраций $^3\text{He}/^4\text{He}$ в 8 раз большим, чем газы атмосферы. А такие площади активного вулканизма, тесно связанные с мантией Земли, как, например, Гавайские о-ва и Йеллоустонский парк в США, характеризуются отношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ в 30 раз большим, чем в атмосфере. По-видимому, в глубинах этих регионов существуют магматические резервуары, не претерпевшие дегазации и содержащие значительное

² Kuroda P. The Oklo Phenomenon. W. B., 1982; Шуколюков Ю. А. Все ли понятно в феномене Окло. — Природа, 1984, № 7, с. 14.

количество первичного гелия. Систематические режимные наблюдения за количеством и составом поступающих с глубин газов, т. е. за газовым дыханием Земли, в сочетании с одновременными геофизическими наблюдениями позволят выявить многие закономерности газовой динамики на горизонтах, располагающихся под подземным полигоном. Такие наблюдения помогут выяснить характер конвекционных явлений в верхней мантии, отразят тектонические явления.

Изучение поведения флюидов с уровня подземного полигона чрезвычайно важно для установления характера взаимосвязи атмосферы и подземной гидросферы. В последние годы в подземной гидросфере, вернее, подземной водно-газовой системе установлены быстропотекающие пульсационные изменения. Режимные наблюдения на уровне подземного полигона над количественными и качественными изменениями газов, поступающих с глубин, в комплексе с геофизическими информацией должны создать основу для выявления связи этих изменений с внешними космическими силами той или иной природы.

Несомненно, что подобные исследования дадут качественно новую информацию о глубинных процессах, позволяющую вскрыть неизвестные ныне закономерности. Большинство данных будет иметь фундаментальный характер и скажется не только на развитии общих теоретических представлений, но и на решении многих крупных научно-технических и народнохозяйственных проблем — проблем обеспечения человечества энергией, проблем горной механики, проблем прогноза землетрясений и других.

Здесь хотелось бы еще раз остановиться на внутренних источниках энергии Земли. В связи с растущим спросом на энергетическое сырье в последнее время все чаще обращаются к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии. Среди них немалую роль должна сыграть геотермическая энергия, запасы которой огромны и которой пока мы пользуемся в ничтожной степени. Проявление внутренних источников энергии мы видим в грандиозных вулканических явлениях, в катастрофических землетрясениях, сопровождающихся крупномасштабными движениями земной коры.

Лишь низкопотенциальные источники этой энергии, в виде термальных вод, уже применяются для теплоснабжения различных объектов. Однако использование глубинного тепла для получения электроэнер-

гии не получило до сих пор должного развития. Препятствие к этому — слабые знания об особенностях поступления тепла с глубин: устойчивости теплового потока во времени, характеристик источников тепла, передачи тепла, слабая разработка методов отбора подземной энергии. Возможности подземного полигона позволят разработать обоснование рациональных систем возможного извлечения геотермической энергии и создать экономически выгодные рабочие модели эксплуатации глубинного тепла.

В наше космическое время особого внимания заслуживает изучение Земли не как объекта, изолированно существующего в космосе, а как планеты, тесно взаимосвязанной с окружающими ее космическими телами, и в первую очередь с Солнцем и Луной. Для вскрытия существующих тут закономерностей нужны специальные наблюдения с подземного полигона, увязанные с наблюдениями над Землей из космоса.

Накопленные за последние несколько лет режимные данные о поступлениях газов из недр во многих случаях четко показывают связь с приливно-отливными явлениями, вызванными лунным притяжением. Единнадцатилетняя периодичность активности Солнца, по некоторым данным, находит отражение в оживлении вулканической деятельности на земном шаре. Установлено, что время крупных землетрясений в Южной Калифорнии хорошо коррелирует со временем суточных и полусуточных приливов. Изучение земных приливов на уровне подземного полигона в комплексе с другими режимными наблюдениями позволит более полно вскрыть причинно-следственные связи между земными процессами и космическими факторами.

Режимные работы на полигоне должны сказаться на представлениях о магматизме, вулканизме, природе сейсмических явлений, рудообразовании, развитии тектонических процессов и на прогнозировании катастрофических явлений.

Проблемы экологии также обогатятся фундаментальным фактическим материалом. Например, могут быть изучены и проблемы захоронения в глубинах загрязненных и токсичных вод, твердых продуктов отдельных производств. Мы сможем понять особенности их поведения в зависимости от условий захоронения и временного фактора, выявить необходимые пути технического обеспечения безопасности подземной гидросферы, с которой связаны и питьевые источники.

В условиях подземного научного полигона могут получить развитие исследования по биотехнологии, например проблемы преобразования остаточной нефти и органических веществ осадочных толщ в метан в результате жизнедеятельности метанобразующих бактерий. Такие бактерии обнаружены в зонах, нагретых до 200—250°C.

В ближайшем будущем могут возникнуть новые проблемы, в частности поиск технически обоснованных и экономически выгодных способов проникновения на большие глубины с помощью горных выработок. По-видимому, появится и будет внедряться новая технология подземного извлечения ряда полезных ископаемых. Не исключена постановка вопроса о переводе некоторых безотходных и максимально автоматизированных химических производств под землю.

Итак, комплекс проблем, которые можно решить с помощью подземной глубинной лаборатории, весьма широк. Он далеко не исчерпывается теми задачами, которые уже перечислены. Не касаясь целого ряда вопросов, связанных непосредственно с проходкой сверхглубокой выработки, представим, какой она должна быть.

СВЕРХГЛУБОКАЯ ВЫРАБОТКА

Глубокие выработки глубиной до 3,5—4,0 км существуют в настоящее время в рудниках ЮАР, а также на широко известном золоторудном месторождении в Индии — Колар Майн. Здесь на глубине 2,5 км физиками успешно ведутся специальные исследования.

Так что можно считать, что создание глубокого подземного полигона для комплексных исследований — дело хотя не простое, но вполне достижимое.

В качестве первого варианта для предварительных оценок наиболее выгодной представляется наклонная выработка.

Проектировать ее по техническим условиям можно на глубину 5—6 км. Главными факторами, лимитирующими такую проходку, будут горное давление и температура. Опыт проходки Кольской сверхглубокой скважины говорит о том, что можно разработать способы преодоления этих трудностей и в случае проходки горной выработки. Во всяком случае, двенадцатикилометровая глубина с температурой в скважине около 200°C оказалась доступной при современных технических возможностях.

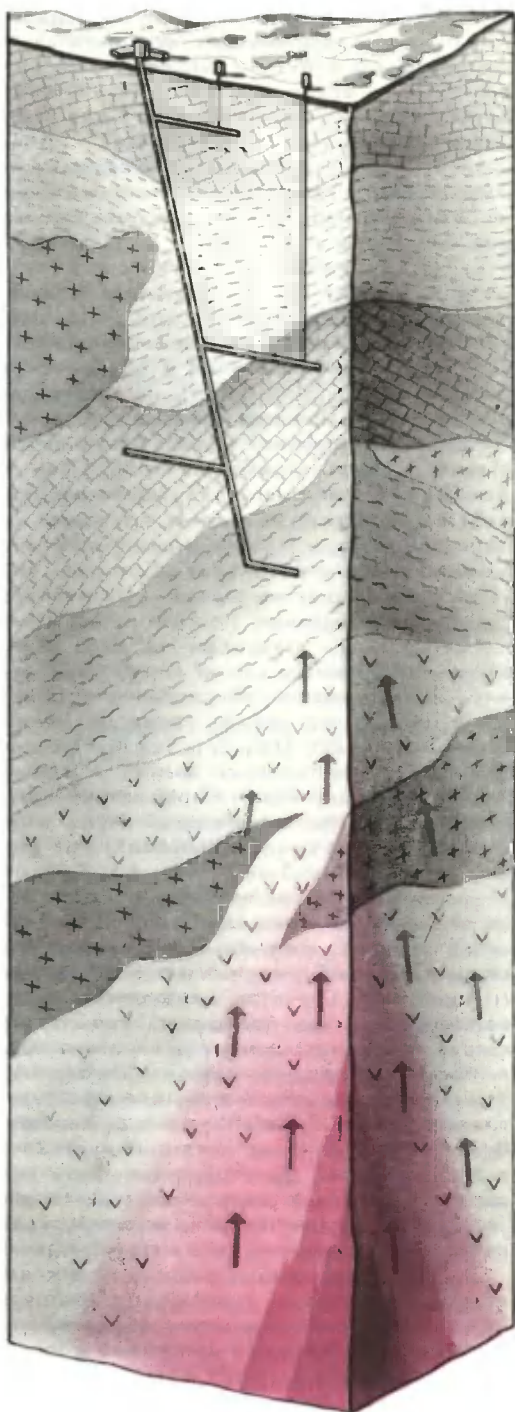


Схема проходки сверхглубокой выработки для создания в ней научного подземного полигона.

С проходкой на глубину на отдельных отметках пробиваются горизонтальные выработки, а в них — штреки, залы для размещения вспомогательных технических служб, исследовательских камер для установки измерительной аппаратуры, предназначенной для наблюдений за свойствами горных масс и процессами, протекающими на разных горизонтах коры, расположенных над полигоном и под ним.

Для уточнения геологического разреза на глубину 1, 2, 3 км бурятся скважины-спутники. В комплексе с другими техническими устройствами их можно использовать и для регулирования и обеспечения нормальных условий работы на всех уровнях проходки. Проходка первых трех километров сверхглубокой выработки не представит особых технических трудностей и должна дать материал для технических разработок, которые обеспечат проходку на большую глубину. Проходка выработки глубиной в 5—6 км потребует примерно 10—12 лет. Ближайшая же задача — разработка строго обоснованных программ по всем проектируемым разделам исследований, вариантов проектов самой выработки, технико-экономическое обоснование проблемы в целом, что займет также не менее трех-четырёх лет. Ценность тех фундаментальных и практических знаний, которые мы сможем получить с помощью глубокого подземного полигона, с лихвой окупит вложение немалых средств, необходимых для его создания.

Существенным является и место заложения подземного полигона. Этот вопрос, конечно, должен стать предметом специального обсуждения и оценки разных специалистов. С учетом намечаемых задач важно разместить подземный полигон на таком участке, где наиболее вероятна конвекционная тепловая связь с глубинами. Удачным в этом отношении мне представляется район Приэльбрусья на Кавказе. Вулкан Эльбрус — не потухший вулкан — в его восточной привершинной части выходят газопаровые струи, которые свидетельствуют о существовании в теле вулкана канала — проводника тепла с глубин.

Сверхглубокую выработку можно заложить в некотором удалении от Эльбруса на площади развития древних образований. В этих местах имеются доступные дороги, а климатические условия позволяют работать круглый год.

Перечисляя задачи, которые можно будет решить с помощью полигона, я не остановился на собственно горно-технических проблемах, которые возникнут при

создании полигона. Круг их чрезвычайно широк, это не только преодоление высоких температур и давления, но и вопросы управления этими параметрами, а также свойствами горных пород, упругими напряжениями, деформациями, проницаемостью, существующими в них порами и трещинами, механизмами выделения газов и другие специальные задачи. Разработки потребуют вопросы жизнеобитания — обеспечение условий, необходимых для работы на таких глубинах. Создание подземного полигона потребует новых материалов, годных для работы в экстремальных условиях, и прецизионной аппаратуры с автоматическим управлением, целого комплекса новых горно-проходческих машин, что послужит стимулом для развития многих отраслей промышленности.

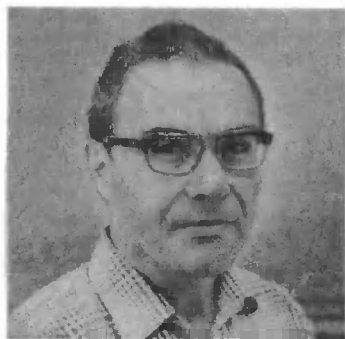
Создание подземного научного полигона в сверхглубокой выработке — это очередной крупный этап проникновения человека в недра. Научно-технический прогресс в условиях нашего социалистического государства позволил нам первыми выйти в космическое пространство, а также проникнуть в недра Земли на двенадцатикилометровую глубину с помощью Кольской сверхглубокой скважины. Она показала возможность войти в непосредственный «контакт» с 5—6-километровыми глубинами, но уже в условиях горной выработки, что обещает открыть широкие перспективы для научного познания недр и их практического освоения.

Нужно отметить, что когда человек устремился в космос, были решены сложнейшие технические задачи; преодолели они и на Земле. Как ни влечет к себе космос с его величием и неразгаданностью, счастье жизни человечества все же более связано с самой нашей планетой. Поэтому необходимость основательного изучения глубоких зон Земли и протекающих там процессов должна найти отражение в планах на ближайшее будущее не только в отдельных странах, но и в планах международного сотрудничества.

Все, что взял человек из недр за все время своего существования — ничтожно по сравнению с ценностями, скрытыми на глубине и непознанными до настоящего времени. Наступает новый этап изучения недр, необходимый для обеспечения будущего человечества.

Измерение симметрии

А. Б. Ройцин



Александр Брониславович Ройцин, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института полупроводников АН УССР. Область научных интересов — радиоспектроскопия, квантовая химия, теория твердого тела. Автор монографий: Парамagnetный резонанс. Киев, 1963; Некоторые применения теории симметрии в задачах радиоспектроскопии. Киев, 1973; Электрические эффекты в радиоспектроскопии (совместно с М. Д. Глинчук и др.). М., 1981.

Каждый из нас в повседневной жизни имеет свое, вполне определенное представление о симметрии и симметричном. Обилие встречающихся в обиходе примеров приводит к мысли о том, что число различных симметрий (воспринимаемых часто интуитивно) бесконечно. Но вот понять, чем отличается одна симметрия от другой и что в них общего, скажем, чем разнятся симметрии одноцветного кубика и бабочки, оказывается, уже не так просто.

Главной характеристикой любой симметричной фигуры служит количество элементов симметрии, т. е. способов, которыми эту фигуру можно полностью совместить с ней самой. Элементами симметрии могут быть повороты вокруг некоторых осей на определенные углы, трансляции, отражения в плоскостях, инверсия и т. д.

Измерить (определить) симметрию фигуры — значит найти все ее элементы симметрии. Для окружающих нас предметов, таких как кубики, пирамиды, дома, цветы, нахождение элементов симметрии не представляет особого труда. Но как быть с объектами, которые нельзя увидеть и тем более вращать, как кубики?

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Один из примеров симметричных объектов микромира — молекулы. Расстояния между атомами или ионами в них порядка 10^{-8} см, что, безусловно, затрудняет их изучение, в частности определение их симметрии. Нас в дальнейшем будут интересовать несколько иные, хотя и очень похожие на молекулы, объекты. Это дефекты кристаллов.

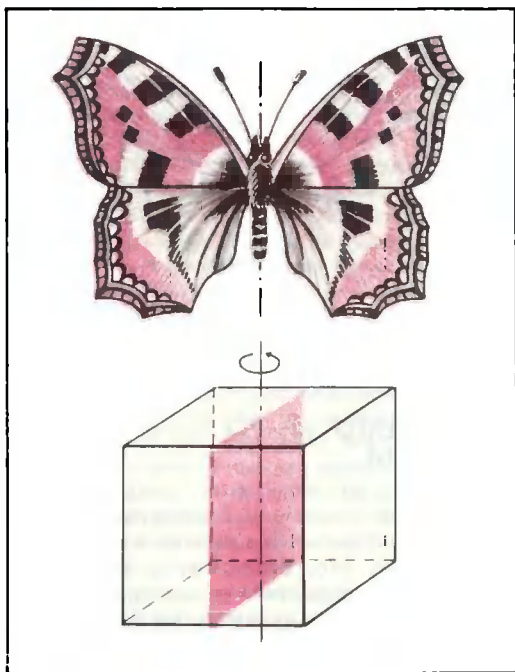
Существующие в природе или вырабатываемые искусственно кристаллы всегда отличаются от идеальных, иными словами, строгая периодичность атомов в них так или иначе нарушена. Эти нарушения называются дефектами кристаллической решетки. Известно много различных типов дефектов: вакансии и межузельные атомы (а также их скопления), примеси, дислокации, микротрещины и т. д.¹

¹ Подробнее о различных видах дефектов в кристаллах см., напр.: Виницкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979; Келли А., Гроувс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М., 1974; Орлов А. Н., Трушин Ю. В. Моделирование на ЭВМ радиационных дефектов и процессов в кристаллах. — Природа, 1983, № 10, с. 34.

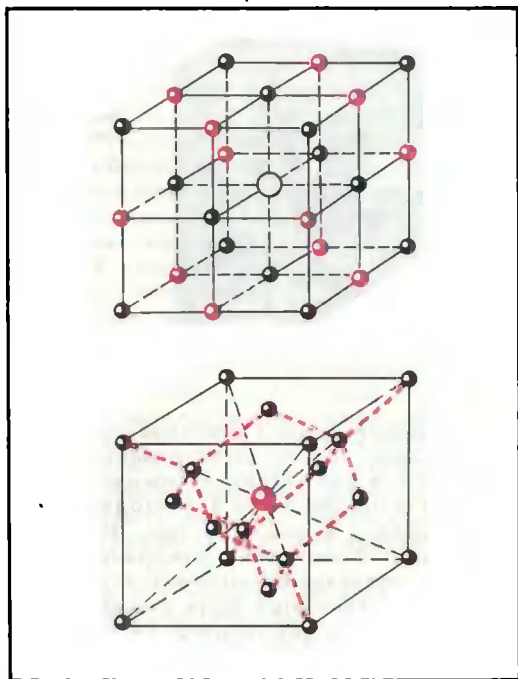
Дефекты серьезно влияют на механические, тепловые, магнитные, оптические, химические и другие свойства кристаллов. Различные металлические конструкции и биологические объекты, полупроводниковые приборы, лазеры и мазеры — вот далеко не полный перечень применений кристаллических веществ, содержащих различного рода дефекты. От вредных дефектов необходимо избавляться, а полезными (бывают и такие) надо уметь управлять. Для этого требуется

ладать определенной симметрией. Но в отличие от свободных молекул, ориентированных в пространстве хаотично, дефекты в кристалле определенным образом упорядочены. Последнее обстоятельство заметно облегчает их исследование.

Между строением дефектов (как и молекул) и их симметрией существует тесная связь. Если структура дефектов известна, из нее однозначно вытекает их симметрия. Обратное, конечно, неверно, так как одной и той же симметрией,



Примеры симметрий. Бабочка совмещается сама с собой только при отражении в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка и изображенной штрих-пунктирной прямой. У куба элементов симметрии гораздо больше: отражения в трех плоскостях, проходящих через середины противоположных ребер (одна из них отмечена цветом); повороты на 90° , 180° и 270° вокруг осей, соединяющих центры противоположных граней (на рисунке показана одна из осей), и т. д. Желаящие поупражняться могут насчитать 48 различных элементов симметрии.



Простейшие примеры дефектов кристаллической решетки. Вакансия (светлый кружок) в кристалле со структурой поваренной соли — вверху. Симметрия этого дефекта совпадает с симметрией куба и соответствует точечной группе O_h . Черными точками изображены ионы одновалентных металлов (Li, Na, K, Rb, Cs), цветными — ионы галлоидов (Cl, F, Br, I). Внизу — примесный атом внедрения в кристалле со структурой алмаза. В этом случае симметрия дефекта совпадает с симметрией правильного тетраэдра и соответствует точечной группе T_d . Цветом выделен атом примеси, черные точки — атомы кристалла (C, Si, Ge).

распознавать дефекты, т. е. определять их природу и структуру.

По своему строению дефекты кристалла напоминают молекулярные образования. Как и молекулы, дефекты об-

вообще говоря, могут обладать различными по структуре дефекты (число всевозможных дефектов значительно превосходит количество характеризующих их симметрий). Вместе с тем знание симметрии

32 точечные группы симметрии молекул и дефектов

Тип симметрии	Ромбическая			Аксиальная						Кубическая	
Совокупности групп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Группы	$C_1(1)$ $C_i(2)$	$C_2(2)$ $C_s(2)$ $C_{2h}(4)$	$C_{2v}(4)$ $D_2(4)$ $D_{2h}(8)$	$C_4(4)$ $S_4(4)$ $C_{4h}(8)$	$C_{4v}(8)$ $D_4(8)$ $D_{2d}(8)$ $D_{4h}(16)$	$C_3(3)$ $S_6(6)$	$C_{3v}(6)$ $D_3(6)$ $D_{3d}(12)$	$C_6(6)$ $C_{3h}(6)$ $C_{6h}(12)$	$C_{6v}(12)$ $D_6(12)$ $D_{3h}(12)$ $D_{6h}(24)$	$T(12)$ $T_h(24)$	$O(24)$ $T_d(24)$ $O_h(48)$

помогает выяснению природы дефекта, поскольку уменьшает число вариантов структур, подлежащих перебору, а в ряде случаев позволяет практически однозначно определить его структуру. Вот почему измерению симметрии дефектов придается сегодня столь большое значение.

СКОЛЬКО СИММЕТРИЙ В ПРИРОДЕ

Различные симметрии приняты характеризовать группами симметрии. Каждая такая группа содержит присущий только ей определенный набор элементов симметрии. При исследовании строения дефектов представляют интерес не все группы симметрии, а лишь так называемые точечные, отличительный признак которых — наличие выделенной точки (центра фигуры), не меняющей своего положения при любых преобразованиях симметрии.

Как установлено экспериментально, общее число точечных групп, встречающихся в природе в качестве групп симметрии молекул и дефектов, равно 32. Все они (в принятых в кристаллографии обозначениях) приведены в таблице. В скобках указано число элементов симметрии в данной группе. В дальнейшем мы увидим, что эти группы целесообразно распределить по 11 совокупностям и трем различным типам симметрии. Детальное описание групп, т. е. указание видов входящих в них элементов симметрии, ниже нам не понадобится². Отметим лишь, что, например, группа O_h представляет собой группу симметрии куба, а группа C_{3v} описывает симметрию равностороннего треугольника.

Как же измерить симметрию дефекта? В настоящее время полностью решить эту проблему можно, пожалуй, только средствами радиоспектроскопии (магнитных резонансов)³.

МАГНИТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Принято выделять два типа магнитных резонансов: электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Существуют и всевозможные их разновидности: бесполовой ЭПР, ядерный квадрупольный резонанс, двойные резонансы (электронно-электронный, ядерно-ядерный, электронно-ядерный, оптико-магнитный) и даже тройные резонансы. Такое обилие методик вызвано необходимостью увеличить чувствительность приборов, повысить их разрешающую способность, приспособиться к конкретным объектам и условиям эксперимента. В идейном же плане все эти методы сводятся к ЭПР либо ЯМР. Так как эти два резонанса, в свою очередь, очень схожи, мы ограничимся рассмотрением ЭПР, который в большей степени отвечает цели статьи — рассказу о том, как найти симметрию дефектов.

ЭПР был открыт в 1944 г. известным советским физиком Е. К. Завойским. Это физическое явление, характеризующееся поглощением или излучением электромагнитных волн в диапазоне радиочастот, наблюдается в парамагнетиках (что объясняет происхождение в названии явления слова «парамагнитный»). Оно — резо-

² Описание всех 32 точечных групп можно найти, напр., в книге: Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М., 1975.

³ О первых шагах электронной микроскопии в этом направлении говорится в статье: Рожанский В. Н. Наблюдение отдельных атомов в электронном микроскопе. — Природа, 1982, № 5, с. 21.

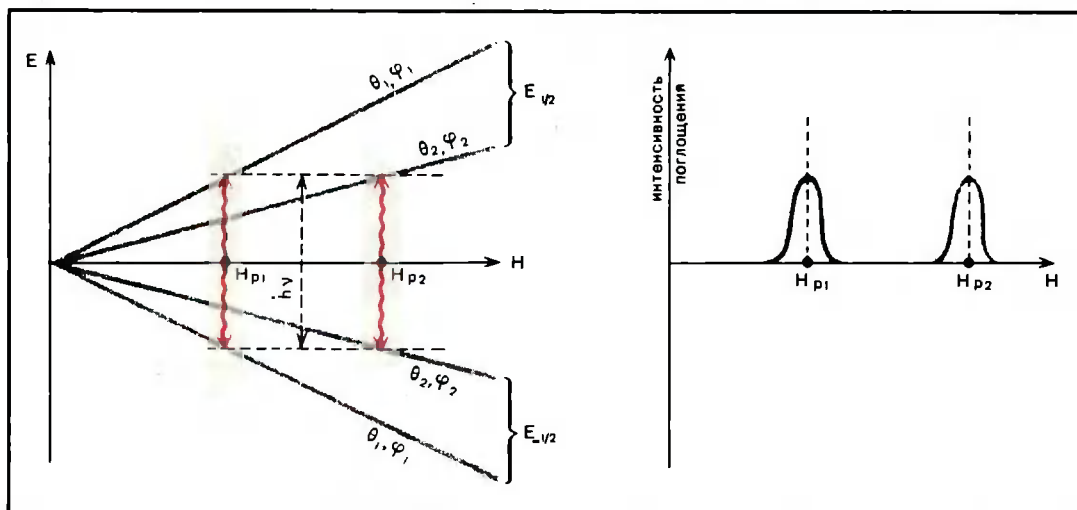
нансно, т. е. происходит на определенной частоте ν , соответствующей разности энергетических уровней E_1 и E_2 , отличающихся лишь ориентацией момента количества электронов (отсюда и слова «электронный резонанс»):

$$\nu = (E_1 - E_2)/h, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка. Иначе говоря, при переходах механический и связанный с ним магнитный моменты электронов изменяют свое направление. Дефекты

суждениях электронные моменты заменить ядерными).

ЭПР изучается в разделе физики, называемом радиоспектроскопией. Основной прибор — радиоспектроскоп (выпускаемый в настоящее время уже серийно) — представляет собой довольно сложное устройство для регистрации весьма слабых сигналов поглощения электромагнитных волн веществом. Характерные частоты этих волн порядка 10^{10} Гц, поэтому в исследованиях методом ЭПР широко применяется техника СВЧ (волноводы и



Схематическое изображение ЭПР. Слева — в кристалле, помещенном во внешнее магнитное поле, у дефекта с моментом $J=1/2$ имеются два уровня $[E_{1/2}$ и $E_{-1/2}]$, разность энергий E которых изменяется пропорционально величине напряженности поля H . Эта разность зависит также от ориентации поля по отношению к кристаллографическим осям, задаваемой в сферической системе координат углами θ и φ . При определенных (резонансных) значениях магнитного поля H_{p1} и H_{p2} соответствующих значениям этих углов θ_1, φ_1 или θ_2, φ_2 , величина E становится равной кванту энергии СВЧ-излучения (расстоянию между пунктирными линиями на рисунке) и происходит квантовый переход с одного уровня на другой, сопровождающийся поглощением энергии $h\nu$. При этом в спектре поглощения наблюдаются характерные колоколообразные всплески, регистрируемые на осциллооскопе или самописце (справа). Положение их максимумов определяется значениями H_{p1} и H_{p2} .

кристалла также обладают вполне определенными механическими и магнитными моментами, что позволяет считать их своего рода парамагнитными частицами и, стало быть, исследовать с помощью ЭПР.

Все сказанное о ЭПР полностью справедливо и для ЯМР (надо только в рас-

резонаторы). Образец объемом несколько кубических миллиметров помещается в ту область внутренней полости резонатора, где магнитная составляющая электромагнитной волны, вызывающей переходы, имеет максимальное значение. Резонатор устанавливают между полюсами мощного электромагнита, создающего магнитное поле напряженностью около 1000 Э. Оно определяет систему магнитных энергетических уровней, между которыми происходят переходы. Сигнал в виде типичного колоколообразного всплеска в спектре поглощения наблюдается с помощью осциллооскопа или самописца.

С точки зрения квантовой механики, ЭПР аналогичен любому физическому явлению, связанному с поглощением электромагнитных волн в результате квантового перехода с одного энергетического уровня системы на другой. Отличие заключается лишь в величине частоты, определяемой из уравнения (1), и природе уровней, между которыми происходят переходы. Конкретная конструкция прибора в экспери-

ментах по регистрации спектров поглощения определяется значением частоты.

ЭПР частично удается объяснить с помощью классических представлений о движении магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Полное же его описание возможно лишь в рамках квантовой механики.

КАК НАЙТИ СИММЕТРИЮ ДЕФЕКТА

В любой квантовомеханической задаче, связанной с изучением переходов, прежде всего необходимо выбрать модель рассматриваемой системы. В интересующем нас случае это значит — ограничиться наиболее существенными взаимодействиями частиц дефекта между собой и с внешними полями. Энергия всех этих взаимодействий входит в основное уравнение квантовой механики — уравнение Шредингера⁴. Решив это уравнение, находят энергетические уровни системы, разность энергий которых определяет частоты переходов. Затем вычисляют вероятность перехода для конкретной частоты, т. е. интенсивность спектральной линии ЭПР. Теоретические результаты для наблюдаемых величин сравнивают с соответствующими экспериментальными данными. На основе такого сопоставления делают вывод об адекватности выбранной теоретической модели и определяют из эксперимента отдельные характеристики исследуемого объекта.

Для нас важно то, что упомянутые выше взаимодействия сильно зависят от структуры дефекта и главным образом от его симметрии. Если симметрия дефекта, характеризующая одной из перечисленных в таблице групп, отражена в гамильтониане уравнения Шредингера правильно, теоретические расчеты согласуются с результатами эксперимента, в противном случае наблюдается заметное расхождение. Представим теперь себе, что у нас имеется набор всех 32 возможных гамильтонианов, каждый из которых отражает оп-

ределенную симметрию дефекта. «Примеряя» последовательно каждый из них к экспериментальным данным для конкретного кристалла, мы лишь в каком-то одном случае добьемся согласия теории с экспериментом и таким образом определим симметрию дефектов.

Но как получить 32 различных гамильтониана и можно ли это сделать в принципе?

ТРИ ТИПА СИММЕТРИИ ДЕФЕКТОВ

Для иллюстрации сказанного выше и последующих обобщений мы остановимся на самом главном в рассматриваемой задаче и в то же время довольно простом взаимодействии — взаимодействии магнитного момента дефекта $\vec{\mu}$ с внешним магнитным полем H . Соответствующий член в гамильтониане W_H принято называть зеемановским (в честь голландского физика П. Зеемана, открывшего еще в 1896 г. расщепление спектральных линий атома в магнитном поле). Выражение для W_H , широко известное для свободных атомов, можно представить в виде:

$$W_H = -(\vec{\mu}\vec{H}) = g\beta(\vec{J}\vec{H}) \quad (2)$$

где g — коэффициент пропорциональности между суммарными механическим $\vec{J}$ и магнитным $\vec{\mu}$ моментами электронов в атоме, называемый обычно фактором спектроскопического расщепления или просто g -фактором, а β — универсальная физическая постоянная (магнетон Бора). Основным параметр, характеризующий конкретный атом (и дефект) — это как раз g -фактор.

Для дефекта в кристалле формула (2) обобщается:

$$W_H = \beta(g_1 J_x H_x + g_2 J_y H_y + g_3 J_z H_z). \quad (3)$$

В ней уже не один параметр g , а целых три (g_1, g_2, g_3 — компоненты g -фактора), иными словами, каждое из составляющих скалярного произведения векторов $\vec{J}$ и $\vec{H}$, соответствующее их проекциям на оси X, Y, Z прямоугольной системы координат, входит со своим собственным коэффициентом⁵. Различие формул (3) и (2) вызвано тем,

⁴ Это дифференциальное уравнение для волновой функции ψ системы частиц (в интересующей нас задаче — частиц дефекта) можно записать в виде

$$(\hat{W} - E)\psi = 0,$$

где E — энергия частиц, а $\hat{W}$ — оператор, зависящий от импульсов и координат частиц и называемый оператором полной энергии системы, или гамильтонианом. В дальнейшем всюду слово «гамильтониан» используется для обозначения энергии взаимодействия частиц дефекта между собой и с различными внешними полями.

⁵ Не имея из-за недостатка места возможности подробнее обсуждать происхождение составляющих g -фактора, отметим лишь, что их различие связано с анизотропией кристаллов.

что симметрия дефекта ниже сферической симметрии свободного атома (самой высокой из точечных симметрий), содержащей бесконечное число элементов, например повороты на любой угол вокруг любой оси. В выражении (3) возможны три варианта: все три компонента g -фактора равны, совпадают лишь два компонента и, наконец, все компоненты различны. Принято говорить, что симметрия гамильтониана (3) в первом случае кубическая, во втором — аксиальная, в третьем — ромбическая.

Что же это такое — симметрия гамильтониана?

Каждому элементу некоторой группы симметрии сопоставим определенное преобразование (переход к новой системе) координат. Совершим эти преобразования над векторами в формуле (3). Если при этом ее вид во всех новых системах координат не меняется, говорят, что симметрия гамильтониана соответствует рассмотренной группе. В качестве примера преобразования координат выберем поворот на 90° вокруг оси Z (этот элемент симметрии содержится как в группе симметрии куба O_h , так и в некоторых других). При таком преобразовании ($X \rightarrow Y$, $Y \rightarrow -X$, $Z \rightarrow Z$)

$$W_H = \langle g_1 J_x, H_x + g_2 J_y, H_y + g_3 J_z, H_z \rangle. \quad (4)$$

Видно, что это преобразование оставляет в новой системе координат выражение для W_H неизменным, лишь если $g_1 = g_2$, т. е. в случае кубической или аксиальной симметрий.

Предположим теперь, что для всех элементов каждой из групп мы выполнили по отношению к выражению (3) необходимые для выявления симметрии гамильтониана преобразования. Тогда при различии всех компонентов g -фактора только 8 групп, расположенных в первых трех столбцах таблицы, не меняют вид гамильтониана. При $g_1 = g_2 \neq g_3$ к ним добавляются еще 19 групп, помещенных в столбцах 4—9. И лишь при $g_1 = g_2 = g_3$ все 32 группы не меняют вида выражения (3). Именно в соответствии с этим результатом и распределены все группы в таблице по трем типам симметрий⁶.

Итак, для зеемановского взаимодействия существуют всего три типа гамильтонианов, каждый из которых однозначно связан с присущими лишь ему выражениями для наблюдаемых характеристик. Поэтому из сопоставления этого простейшего варианта теории с экспериментом нам удастся только заключить, что искомая симметрия дефекта характеризуется одной из 5 кубических или одной из 19 аксиальных либо одной из 8 ромбических групп симметрий — в зависимости от того, какой из трех гамильтонианов описывает эксперимент.

Одна из причин этой неоднозначности, по-видимому, обусловлена тем, что в такой модели не учтены все возможные взаимодействия. Действительно, в ней не принимаются в расчет, например, взаимодействие дефекта с электрическим полем окружающих атомов и магнитным полем ядерных моментов.

Однако полностью учесть все эти взаимодействия сложно. Поэтому некоторые из них приходилось учитывать лишь частично и описывать упрощенно. Но такой приближенный учет, как оказалось, ничего существенного не меняет с точки зрения симметрии гамильтониана. Так, взаимодействия с электрическим полем кристалла и магнитным полем ядра по аналогии с (3) можно представить в виде:

$$W_k = D_1 J_x^2 + D_2 J_y^2 + D_3 J_z^2 \quad (5a)$$

$$W_l = A_1 J_x I_x + A_2 J_y I_y + A_3 J_z I_z, \quad (5b)$$

где I — механический момент (спин) ядра, а D_i и A_i — параметры этих взаимодействий, как и g_i , меняющиеся от дефекта к дефекту. В зависимости от соотношений между коэффициентами D_i или A_i получаем те же три вида симметрии. Поэтому в течение длительного времени для объяснения экспериментов использовали лишь гамильтонианы трех типов симметрии. Да и сейчас нередко встречается это упрощенное описание. Так что рассмотренное в этом разделе зеемановское взаимодействие имеет не только методический интерес, но и отражает на-

⁶ Во избежание недоразумений подчеркнем, что основной принцип распределения групп по типам симметрии сводится к требованию, чтобы вид гамильтониана (характеризуемый одним из трех возможных соотношений между компонентами g -фактора) не ме-

нялся данной группой преобразований. Поэтому не должен вызывать удивление, например, тот факт, что к кубической симметрии отнесены лишь группы, помещенные в последних двух столбцах таблицы, хотя при равенстве компонентов g -фактора все 32 группы не меняют вид гамильтониана.

чальный этап в развитии исследований симметрии дефектов с помощью ЭПР⁷.

ЧТО ИЗМЕРЯЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАТОР

Прежде чем рассказывать о дальнейшем совершенствовании радиоспектроскопических методов исследования кристаллов, упомянем о том, как проводится эксперимент и как параметры гамильтониана связаны с наблюдаемыми величинами. Как и раньше, для простоты ограничимся лишь зеемановским взаимодействием.

Решив уравнение Шредингера с гамильтонианом (3), мы найдем набор возможных значений энергии электронов дефекта (энергетических уровней):

$$E_m = \bar{g} \mu_B M_N, \quad (6)$$

где $M_N = -J, -J+1, \dots, J-1, J$, а $\bar{g}$ в сферической системе координат записывается следующим образом:

$$\bar{g} = \sqrt{g_1^2 \cos^2 \theta + (g_2^2 \cos^2 \varphi + g_3^2 \sin^2 \varphi) \cdot \sin^2 \theta}. \quad (7)$$

Из формул (1) и (6) следует, что частота перехода между двумя соседними уровнями

$$h\nu = \bar{g} \mu_B H. \quad (8)$$

Метод ЭПР обладает одной важной особенностью, отличающей его от других резонансных методик. В экспериментах по ЭПР для настройки на резонанс удобнее менять не частоту ν электромагнитной волны, а внешнее статическое магнитное поле H , резонансное значение которого, как следует из соотношения (4), равно

$$H_p = H_0 / \bar{g}, \quad (9)$$

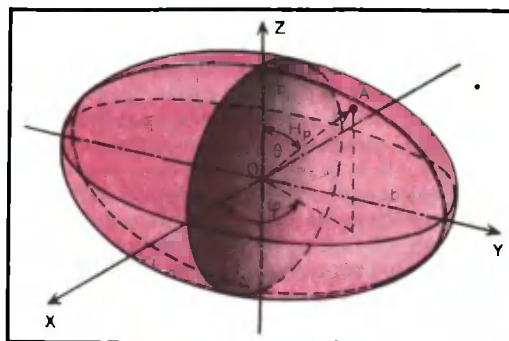
где постоянный коэффициент $H_0 = h\nu / \mu_B$. Это выражение и сопоставляют с экспериментальным значением H_p . В формуле (9)

⁷ Читатель, по-видимому, обратил внимание на то, что в формуле (3) при $g_1 = g_2 = g_3$ формально нельзя отличить кубическую симметрию от сферической, т. е. симметрии свободного атома. Аналогично при $g_1 = g_2$ гамильтониан имеет более высокую (цилиндрическую) симметрию, чем любая точечная группа аксиальной симметрии. Только знание того, что мы имеем дело с дефектами кристалла, помогает устранить эти дополнительные неопределенности. В более совершенной теории, рассматриваемой ниже, они уже не возникают.

особенно важна зависимость H_p от углов θ и φ , т. е. от ориентации внешнего магнитного поля по отношению к осям координат, жестко связанным с кристаллографическими осями.

Посмотрим, как с помощью этой формулы находят симметрию дефекта. Для кубической симметрии ($g_1 = g_2 = g_3 = g_0$) из формулы (7) следует $\bar{g} = g_0$ и выражение (9) не зависит от углов θ и φ . При $g_1 = g_2 = g_\perp$ получаем

$$\bar{g} = (g_0^2 \cos^2 \theta + g_\perp^2 \sin^2 \theta)^{1/2},$$



Угловая зависимость резонансного значения H_p напряженности магнитного поля в методе ЭПР. Ограниченная поверхность $H_p(\theta, \varphi)$ фигура представляет собой трехосный эллипсоид, полуоси которого a, b, c соотносятся между собой, как компоненты спектроскопического фактора дефекта (g_1, g_2, g_3). При ромбической симметрии все полуоси различны ($a = H_0/g_1, b = H_0/g_2, c = H_0/g_3$); при аксиальной — две из них совпадают ($a = b = H_0/g_\perp, c = H_0/g_0$), так что трехосный эллипсоид принимает вид вытянутого или сплюснутого эллипсоида вращения; при кубической — все три оси равны ($a = b = c = H_0/g_0$) и эллипсоид превращается в шар. Положение любой точки A на поверхности этого эллипсоида задается сферическими координатами H_p, θ и φ . Оси X, Y, Z совпадают с главными осями эллипсоида.

и величина H_p зависит лишь от изменения магнитного поля H в плоскости, проходящей через ось Z , т. е. не зависит от угла φ . Наконец, в случае ромбической симметрии H_p зависит как от угла θ , так и от угла φ .

Таким образом, если в эксперименте функция H_p не зависит от ориентации магнитного поля, симметрия — кубическая, иными словами, искомая группа симметрии принадлежит одной из групп, перечисленных в двух последних столбцах таблицы. Если же в эксперименте найдена хотя бы одна плоскость, которая отличается от других тем, что при изменении в ней ориентации магнитного поля величина H_p не меняется, можно сделать вывод, что симмет-

рия дефекта соответствует одной из групп, помещенных в столбцах 4—9. И наконец, если при поворотах H в любой плоскости H_p меняется, заключаем, что искомая симметрия относится к одной из групп, расположенных в столбцах 1—3. Во всех этих рассуждениях, конечно, предполагается, что угловая зависимость H_p описывается формулой (9).

Обратим теперь внимание на очень интересный и важный факт.

Построенная таким образом зависимость $H_p(\theta, \varphi)$ представляет собой замкнутую поверхность, ограничивающую фигуру, которую уже можно при желании вылепить или вырезать из дерева и, следовательно, поворачивать как угодно. Эта фигура, в свою очередь, имеет определенную симметрию. Так вот, оказывается, она совпадает с симметрией исходного гамильтониана. Это же справедливо и в более сложных случаях, рассмотренных в следующем разделе, — симметрия поверхности $H_p(\theta, \varphi)$ всегда повторяет симметрию гамильтониана. Но гамильтониан отражает симметрию дефекта, и, стало быть, мы получаем способ непосредственно измерять симметрию микроскопических объектов. Для этого достаточно построить геометрические фигуры (иногда — даже их части), соответствующие найденным из эксперимента угловым зависимостям H_p , и определить их симметрию обычным путем.

ОТ ТРЕХ К ОДИННАДЦАТИ

С тех пор как ввели в рассмотрение три типа симметрии дефектов, радиоспектроскопия шагнула далеко вперед. С одной стороны, экспериментаторы уже сравнительно давно обратили внимание на то, что результаты некоторых экспериментов не согласуются с результатами расчетов с гамильтонианами рассмотренных трех типов. Так, например, из формулы (9) следует, что функция $H_p(\theta, \varphi)$ симметрична относительно любого из своих экстремумов, а сами эти экстремумы чередуются через 90° . Эксперимент же это не подтверждал.

Независимо от этих данных теоретически, основываясь лишь на общих соображениях симметрии, разрабатывали методы построения гамильтонианов. Применительно к теории ЭПР выяснилось следующее:

1. Чтобы построить гамильтониан, не обязательно конкретизировать структуру дефекта и осуществлять приближенные расчеты всех его взаимодействий, как это

делалось раньше. Достаточно задать величину полного момента количества движения электронов J и симметрию точечной группы. Из-за общности исходных пунктов получаемые таким способом гамильтонианы стали называться обобщенными⁸.

2. Сопоставление обобщенных гамильтонианов с использовавшимися ранее (назовем их обычными) показало, что в обобщенных гамильтонианах наряду со слагаемыми, входящими в обычные гамильтонианы, содержатся новые, в частности члены с более высокими степенями J . Например, для кубической симметрии помимо обычного зеемановского взаимодействия возникают члены вида $J^3 H_z + J^3 H_x + J^3 H_y$. Другой тип добавляющихся слагаемых более точно отражает симметрию дефекта. Так, оказалось, что для группы симметрии C_2 члены обычного гамильтониана с ромбической симметрией, содержащиеся, как видно из формулы (4), второй степени проекций момента, следует дополнить перекрестными слагаемыми вида $J_x J_y$.

Анализ дополнительных слагаемых показал, что обычный гамильтониан, как правило, соответствует симметрии более высокой, чем фактическая симметрия дефекта. В силу этого, дополнительные слагаемые обобщенных гамильтонианов получили наименование низкосимметричных, а обусловленные ими эффекты в спектре ЭПР — эффектов низкой симметрии.

3. Чем ниже симметрия дефекта, т. е. чем меньше элементов симметрии содержит соответствующая группа, тем больше дополнительных слагаемых содержит обобщенный гамильтониан⁹.

⁸ Способ получения обобщенных гамильтонианов состоит в написании наиболее общих (мыслимых) выражений для слагаемых гамильтониана, отражающих каждый тип взаимодействия, и последующего их упрощения с учетом требования неизменности вида гамильтониана относительно элементов симметрии рассматриваемой точечной группы. При этом важно учесть все возможные степени компонентов вектора J (максимальная допустимая степень равна $2J$). Эта процедура очень похожа на ту, которая обсуждалась выше в связи с формулой (4).

⁹ Обычно группа высшей симметрии включает все элементы групп более низкой симметрии и еще некоторые дополнительные элементы (так, например, в группе C_{2v} содержатся все элементы группы C_2 , а также два отражения во взаимно перпендикулярных плоскостях). Эти дополнительные элементы можно использовать для упрощения гамильтониана, которое приводит, в конце концов, к сокращению числа его слагаемых (некоторые из них обращаются в нуль, а между другими устанавливаются определенные связи).

4. Чем больше величина J , тем больше дополнительных членов содержит обобщенный гамильтониан и тем точнее он отражает симметрию дефекта.

5. Обобщенный гамильтониан, как и обычный, учитывает три основных взаимодействия частиц дефекта: с внешним магнитным полем, с внутрикристаллическим электрическим полем и с магнитным полем ядра.

Стыковка теории и эксперимента произошла в конце 60-х — начале 70-х годов. Выяснилось, что непонятные особенности в спектре ЭПР полностью описываются дополнительными низкосимметричными слагаемыми обобщенных гамильтонианов. В теории был предсказан ряд новых эффектов низкой симметрии, а эксперимент, в свою очередь, стимулировал ее дальнейшее развитие.

К настоящему времени накопилось уже много экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что эффекты низкой симметрии проявляются довольно часто и в ряде случаев сравнительно велики. С повышением точности измерения эксперименты, интерпретируемые с помощью обобщенных гамильтонианов, станут более распространенными, так как в различных областях науки все шире начинает исследоваться новый класс кристаллов (органические комплексы, биологические объекты и др.), в которых могут возникать дефекты с низкой симметрией.

Методика описания спектров ЭПР на основе обобщенных гамильтонианов в принципе аналогична изложенной выше. Однако при низкой симметрии дефекта и большой величине J число параметров обобщенного гамильтониана значительно превосходит число параметров обычного гамильтониана. Это затрудняет нахождение энергетических уровней, частот переходов, резонансных значений магнитного поля и сопоставление теории с экспериментом. Без быстросовместящих ЭВМ здесь не обойтись.

В таком подходе выяснилось, что при произвольном J существует не 3 обычных, а 11 различных обобщенных гамильтонианов, отражающих реальную симметрию 32 точечных групп. В таблице все группы распределены на 11 совокупностей (столбцов), каждой из которых соответствует свой обобщенный гамильтониан.

Чтобы понять принцип этого распределения, остановимся подробнее на инверсии, упоминавшейся в начале. Это преобразование, при котором любая точка фигуры с координатами x, y, z переходит в точку

с координатами $-x, -y, -z$. Если при этом фигура совмещается сама с собой, инверсия является элементом симметрии этой фигуры, а о самой фигуре говорят, что она обладает центром инверсии, или центром симметрии.

Отличие групп одной совокупности связано с инверсией двояким образом. Во-первых, группы могут различаться тем, что в одной из них есть инверсия, а в другой — нет, как в группах C_i и C_1 , помещенных в 1-м столбце. С другой стороны, элементы различных групп симметрии могут быть связаны операцией инверсии (так, поворот на 180° вокруг некоторой оси и последующая инверсия эквивалентны одной операции — отражению в плоскости, перпендикулярной этой оси). Например, в первой из групп второго столбца (C_2) содержится поворот на 180° , а во второй (C_2) — отражение.

Теперь становится понятно почему существуют не 32, а всего 11 обобщенных гамильтонианов. Дело в том, что проекции момента количества движения и магнитного поля не чувствительны к инверсии. Им «безразлично», есть такая симметрия или нет. А связано это с тем, что $\vec{J}$ и $\vec{H}$ — не «настоящие» (полярные) векторы, как например радиус-вектор точки $\vec{r}$ или напряженность электрического поля $\vec{E}$, а аксиальные (псевдовекторы). Они представимы в виде векторного произведения двух полярных векторов и при инверсии не меняются.

Таким образом, возможности магнитного резонанса в исследовании симметрии дефектов кристаллической структуры имеют принципиальный предел — обычными методами (с использованием только внешних магнитных полей) удастся различить лишь 11 видов симметрий, а не 32 в соответствии с общим числом точечных групп¹⁰. Скажем, можно установить, что симметрия дефекта описывается совокупностью групп, приведенной в четвертом столбце таблицы, но какой именно из них (C_4 , S_4 или C_{4h}) узнать нельзя в принципе.

НА ПОМОЩЬ ПРИХОДИТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Несмотря на то, что благодаря использованию обобщенных гамильтонианов, а также совершенствованию методики и

¹⁰ Еще раз подчеркнем, что три типа: обычных гамильтонианов, рассматривавшиеся выше, возникают лишь вследствие приближенного учета взаимодействия частиц дефекта между собой и с внешними полями.

техники измерений был достигнут значительный прогресс в нахождении симметрии дефектов, по-прежнему существовала неоднозначность трактовки экспериментальных данных. Это, естественно, не могло удовлетворить физиков, хотя и отвечало «природе вещей».

Решение проблемы пришло несколько неожиданно. В 1961 г. в радиоспектроскопии было открыто новое физическое явление, так называемый электрический, или электрополевой, эффект. Суть его сводится к следующему. Если к кристаллу в дополне-

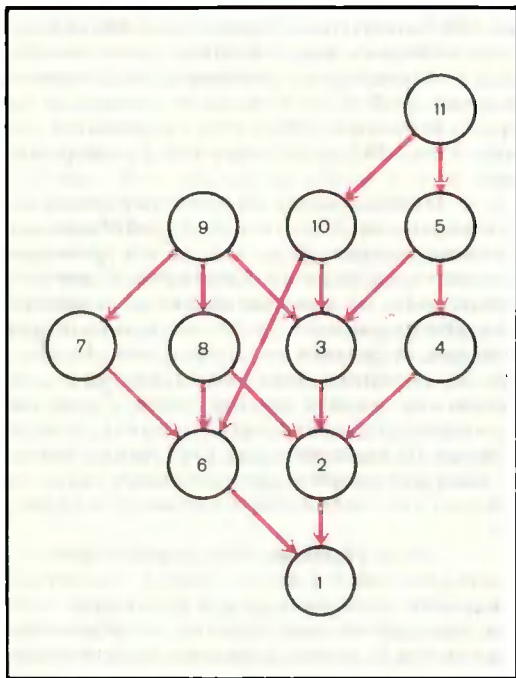
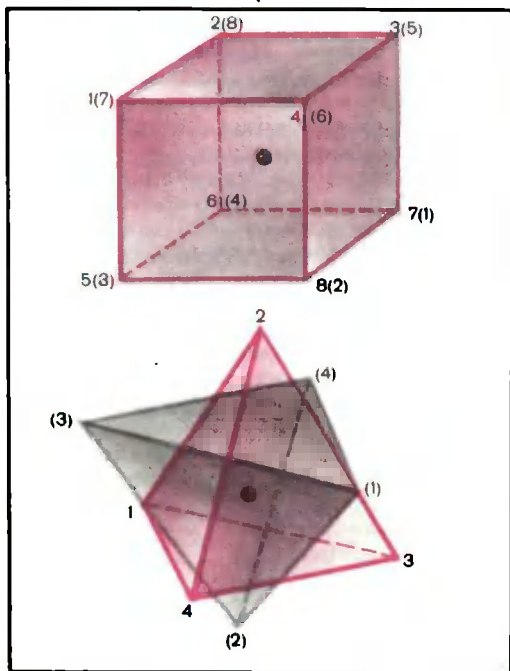


Схема взаимного подчинения (включения) совокупностей точечных групп симметрии. Обычно группа более высокой симметрии содержит все элементы группы более низкой симметрии плюс некоторые дополнительные элементы. При рассмотрении аксиальных векторов можно не учитывать операцию инверсии и говорить о взаимном включении не только отдельных групп, но и совокупностей в целом. Цифры в кружках обозначают номер совокупности в соответствии с таблицей. Совокупность над стрелкой полностью содержит совокупность под стрелкой. Чем выше симметрия совокупности, тем меньше слагаемых и, стало быть, констант в обобщенном гамильтониане.

ние к магнитному приложить еще электрическое поле, в спектре ЭПР происходит смещение или расщепление линий, величина которых пропорциональна напряженности поля $\vec{E}$.

Как следовало из теоретических и экспериментальных исследований этого явления, влиянию электрического поля подвержены не все дефекты. Менялся спектр только тех дефектов, точечная группа симметрии которых не содержала инверсии.

Причину такого «неравноправия» можно понять, обратившись к явному выражению для энергии взаимодействия дефекта с внешним электрическим полем $W_E \approx -(\vec{d} \vec{E})$, где $\vec{d}$ — суммарный электрический дипольный момент электронов дефекта. Это выражение по форме напо-



Примеры преобразования различных фигур при инверсии. Куб при инверсии относительно центра (черная точка) совмещается с собой, тогда как тетраэдр в себя не переходит. В скобках даны номера вершин после инверсии.

минает выражение (2) для энергии взаимодействия дефекта с внешним магнитным полем. Но дипольный момент заряда $e\vec{r}$ равен $e\vec{r}$, поэтому у дефекта с центром инверсии, в котором каждой точке $\vec{r}$ соответствует эквивалентная точка $-\vec{r}$, среднее значение $\vec{r}$, а стало быть, и $\vec{d}$ обращается в нуль. Но именно средним значением дипольного момента определяется смещение линии ЭПР, поэтому у дефектов с центром инверсии оно отсутствует, тогда как в дефектах без центра инвер-

сии среднее значение $\vec{d}$ не равно нулю, и линии в спектре ЭПР смещаются или расщепляются.

Это явление похоже на известный в оптике эффект Штарка—расщепление в электрическом поле спектральных линий атомов. Но ведь свободные атомы обладают, как отмечалось, сферической симметрией, естественно, содержащей инверсию! Никакого парадокса здесь нет, поскольку внешнее поле нарушает сферическую симметрию свободного атома (поляризует его), создавая индуцированный дипольный момент, который, в свою очередь, пропорционален $\vec{E}$. Таким образом, штарковское расщепление спектральных линий атомов оказывается в итоге пропорциональным E^2 . Расщепление же линий ЭПР в дефектах без центра инверсии линейно по полю¹¹.

Из 32 точечных групп 21 не содержит инверсию. Из оставшихся 11 групп в каждую совокупность входит по одной группе (в таблице они замыкают столбцы).

Влияние электрического поля можно учесть, если к обобщенному гамильтониану добавить линейный по $\vec{E}$ член W_0 . Упомянутые выше теоретические методы построения гамильтонианов оказались особенно эффективными при получении выражений для W_0 . Анализ этих выражений, построенных для всех точечных групп, показал, что у групп без инверсии они различаются. Что же касается 11 групп, содержащих инверсию, то для них, естественно, $W_0=0$, т. е. гамильтонианы одинаковы. Однако это обстоятельство для нахождения симметрии уже несущественно, так как все 11 групп с инверсией поровну распределены по 11 совокупностям.

Посмотрим теперь, как методом ЭПР с помощью электрического поля можно в принципе различить все 32 точечные груп-

пы. Для этого проведем мысленный эксперимент в два этапа. На первом, исследуя угловую зависимость H_r , найдем одну из 11 совокупностей, к которой принадлежит искомая точечная группа. На втором этапе включим внешнее электрическое поле. Если наблюдаемые величины зависят от электрического поля, приходим к заключению, что группа симметрии не содержит инверсию. Но для таких групп все гамильтонианы W_0 различны, так что группа определяется однозначно. Если же влияния электрического поля нет, искомая группа содержит инверсию. Но такая группа в совокупности лишь одна, так что и она полностью определена.

УТОЧНЕНИЯ И ДОПОЛНЕНИЯ

Все изложенное выше справедливо для 32 точечных групп, приведенных в таблице. Некоторые группы, которые, как считалось до последнего времени, не реализуются в природе в качестве групп симметрии молекул и дефектов, скажем, группы симметрии икосаэдра $Y(60)$ и $Y_h(120)$, в нее не входят. В последнее время, однако, появились сообщения о том, что существуют объекты, которые могут характеризоваться подобными «запрещенными» симметриями¹². Речь идет о небольших коллоидных частицах, размеры которых настолько малы, что их нельзя рассматривать как кристаллы. Скорее, это большие молекулы, на структуру которых влияют поверхностные силы. Последние, по-видимому, и обуславливают столь необычные симметрии. Правда, вопрос этот еще недостаточно разработан. И если возникнет потребность анализа таких симметрий методами магнитного резонанса, понадобятся дополнительные исследования.

Если известны симметрия идеального кристалла (его пространственная группа) и рентгеноструктурные данные о положении атомов в нем, определение симметрии возникших в нем дефектов облегчается. Дело в том, что между упомянутыми данными об идеальном кристалле и структурой возникающих в нем дефектах установлена определенная связь¹³. Это позволяет иногда без внешнего электрического поля однозначно установить сим-

¹¹ Смещение (расщепление) линий, пропорциональное E , в принципе, может наблюдаться в спектрах ЭПР у дефектов любой симметрии, в том числе и содержащей инверсию. Но этот эффект намного слабее рассмотренного (параметром малости здесь является отношение напряженности E внешнего по отношению к дефекту электрического поля к напряженности внутренних полей, сравнимых по порядку величины с внутренними электрическими полями атомов, достигающими огромных значений), поэтому его удается регистрировать лишь в некоторых кристаллах. К ним относятся, например, сильно поляризующие кристаллы, такие как сегнетоэлектрики.

¹² См., напр.: Морохов И. Д. и др.— Усп. физ. наук, 1981, т. 133, № 4, с. 653.

¹³ Мейльман М. Л., Самойлович М. И. Введение в спектроскопию ЭПР активированных монокристаллов. М., 1977.

метрию дефекта и определить конфигурацию его ближайшего «окружения». И наоборот, зная симметрию дефекта (например, из экспериментов по ЭПР), удастся уточнить пространственную группу кристалла. Последнее обстоятельство сулит радиоспектроскопии более широкие перспективы в изучении структуры вещества.

*

Установить структуру дефекта (после того, как определена его симметрия) помогают дополнительные экспериментальные и теоретические исследования методом двойного электронно-ядерного резонанса. Этот вид магнитного резонанса, который представляет собой ЯМР, наблюдаемый с помощью ЭПР, специально ориентирован на исследование конфигурации дефектов. Таким методом можно регистрировать сигналы ЯМР от каждого из ядер, окружающих дефект, и по ним судить о расположении атомов. Благодаря высокой чувствительности и разрешающей способности метода удастся «прощупывать» до сотни атомов в области дефекта.

Описанный в статье подход применим не только к монокристаллам, но и к порошкам или аморфным веществам, дефекты в которых расположены неупорядоченно. Если приложить к таким системам необходимое для наблюдения ЭПР внешнее магнитное поле, его ориентация окажется различной по отношению к разным дефектам и линии ЭПР для них не совпадут. В результате спектр ЭПР будет состоять из множества линий, слившихся в одну широкую полосу, положение которой уже не зависит от ориентации магнитного поля. Из анализа формы этой линии и приходится извлекать информацию о параметрах гамильтониана и симметрии дефектов. Но этот анализ, конечно, значительно сложнее исследования угловой зависимости одиночной узкой линии, присущей дефектам в монокристалле.

Подведем итоги. Метод электронного парамагнитного резонанса позволяет однозначно указать, какой группой симметрии обладает исследуемый объект. Этот основной вывод базируется на том, что с учетом взаимодействия дефекта с внешним электрическим полем существуют 32 различных гамильтониана, каждый из которых соответствует определенной точечной симметрии. Различие в га-

милтонианах влечет за собой различие энергетической структуры, частот переходов, резонансных значений магнитных полей и других характеристик спектра ЭПР. Сопоставляя их с данными эксперимента, и делают вывод о той или иной симметрии дефекта. Одна из отличительных особенностей спектра ЭПР, отвечающего определенной группе симметрии, — угловая зависимость резонансного значения напряженности магнитного поля, представляющая собой своего рода паспорт симметрии дефекта.

Определение симметрии — пока еще довольно трудоемкое занятие. Полная его автоматизация, вплоть до построения поверхностей $H(\theta, \varphi)$ и исследования их симметрии, позволит создать эффективный экспресс-метод дефектоскопии кристаллов, столь необходимый исследователям самых различных специальностей¹⁴. Действительно, классические объекты, вроде кристаллов поваренной соли или алмаза, составляют ничтожную долю того огромного количества объектов, которые можно исследовать этим методом. К ним относятся практически все вещества, которые изучаются и применяются в физике, химии, геологии, биологии, медицине и многих других отраслях науки и техники. Правда, понятие «дефект», предполагающее нарушение структуры, следует в некоторых случаях трактовать обобщенно. Так, в роли «дефектов» могут выступать молекулярные образования, естественным образом (бездефектно) входящие в те или иные соединения. Это в первую очередь касается биологических объектов, содержащихся в жизненно важных органах живых организмов. Столь же эффективным описанный метод мог бы стать при исследовании кинетики различных процессов.

¹⁴ Интересующиеся более подробным изложением вопросов, рассмотренных в статье, могут найти их, напр., в работах: Ройцин А. Б. Некоторые применения теории симметрии в задачах радиоспектроскопии. Киев, 1973; Усп. физ. наук, 1971, т. 105, № 4, с. 677; Глинчук М. Д. и др. Электрические эффекты в радиоспектроскопии. М., 1981.

Исчезнувшие народы. Буртасы

Г. Е. Афанасьев



Геннадий Евгеньевич Афанасьев, кандидат исторических наук, заведующий сектором охранных раскопок Института археологии АН СССР. Основные интересы сосредоточены в области средневековой истории ирано- и тюркоязычных народов Юго-Восточной Европы.

Низами Гянджеви, изображая около 1203 г. в поэме «Искандер-наме» фантастическое сражение Александра Македонского с объединенным войском народов Юго-Восточной Европы, писал:

Краснолицые русы сверкали. Они
Так сверкали, как магов сверкают огни,
Справа были хазары, буртасов же слева
Ясно слышались возгласы, полные гнева,
Были с крыльев исуицы; предвестьем беды
Замыкали все войско аланов ряды.

Упоминание всех этих народностей у Низами не было случайным. С IX в. целая плеяда арабо- и персоязычных географов включает в свои описания стран сведения о хазарах, буртасах, булгарах, мадьярах, славянах, русах, представлявших в то время реальную политическую силу, от которой зависела стабильность раннефеодальных государственных образований в Поволжье и на Северном Кавказе, византийских колоний в Северном Причерноморье или закавказских владений халифата. От них зависела безопасность путей в Приволжско-Прикаспийском регионе.

Описание страны буртасов составляет важную часть географических трудов вплоть до XVI в. Однако проблема локализации их остается до сих пор нерешенной. Ведь сведения восточных географов

о расстояниях между землями буртасов, хазар и булгар весьма противоречивы, что позволяет наметить несколько десятков вариантов возможного размещения буртасов в Поволжье, каждый из которых опирается на соответствующие источники. Очевидно, проблему нужно решать иначе.

ХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ РАМКИ ЭТНОНИМА «БУРТАС»

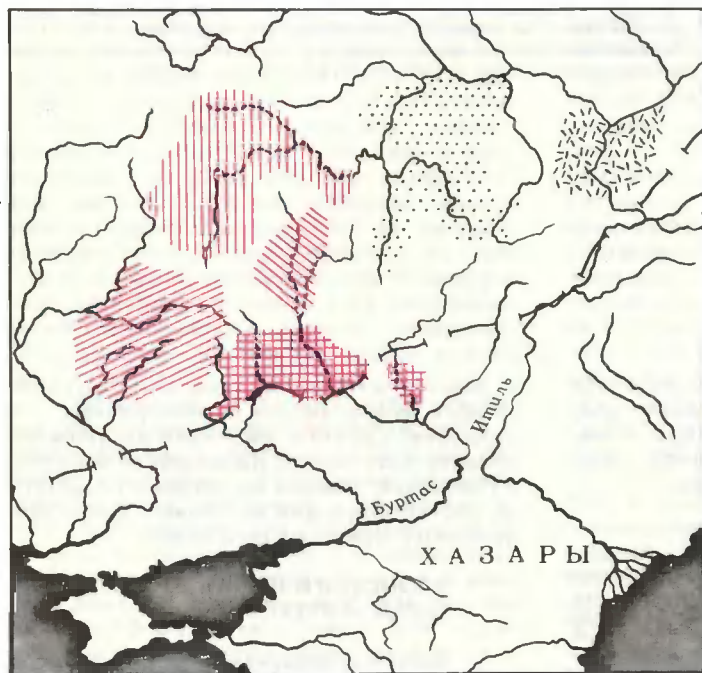
Вопрос о локализации буртасов тесно связан с вопросом о хронологических рамках существования самого этого этнонима в восточных источниках. Точнее, с определением того периода, когда в них появляются достоверные сведения об этом народе. В сочинении арабского географа Кальби, написанном, вероятно, в 819 г., упоминается народ бурджасов. Некоторые историки считают возможным отождествить его с буртасами. Если такое отождествление верно, то можно считать, что сведения о буртасах стали поступать на Восток со второй половины VII в.

Затем буртасы упомянуты в сочинениях восточных географов Ибн-Русте (903 г.), Истахри (903—933 гг.) и Масуди (943—947 гг.), отражающих ситуацию IX в. Но уже в первой половине X в. термин «буртас» требовал объяснения. Так, Ибн-

Хаукаль писал в 976 г.: «В настоящее время не осталось и следа ни из Булгара, ни из Буртаса, ни из Хазара, ибо Русы напали (или истребили) всех их, отняли у них все эти области и присвоили их себе. Те же, которые спаслись от их рук, рассеяны по ближайшим местам, из желания остаться вблизи своих стран и надеясь заключить с ними мир и подчиниться им». Считается, что в этом отрывке речь идет о знаменитом походе киевского князя Святослава на хазар в 965 г. Однако текстологический анализ восточных источников привел историков

XII вв. — Гардизи (1050 г.), Бакри (1094 г.), Марвази (1120 г.), Идриси (1154 г.) — тем не менее подробно описывают буртасов как реально существующее этнополитическое объединение, но, как установлено исследователями, все использованные ими материалы взяты из более раннего времени, например из сочинений араба Джейхани, написанных около 900 г., и фактически отражают ситуацию IX в.

К середине X в. относится и еще один интересный источник с упоминанием о буртасах. Это письмо хазарского царя Иосифа.



Территории, на которых размещены археологические памятники народов, населявших в VIII—X вв. европейскую лесостепную зону.

-  Волжские булгары
-  Мордва и мурома
-  Вятичи
-  Северяне (романская культура)
-  Донские славяне (боршевская культура)
-  Буртасы (лесостепной вариант салтово-маяцкой культуры)
-  Южная граница лесной зоны

к выводу, что уже в начале X в., когда писали Истахри и Масуди, этнополитической общности буртасов не существовало. Материал, которым пользовались географы, был, хотя и достоверен, но мертв. Уже Ибн-Фадлан, проехавший в 922 г. от столицы хазар в низовьях Волги до столицы волжских булгар, ничего не слышал о буртасах, а анонимный автор сочинения 983 г. «Худуд ал-Алем» вообще смешивает их с булгарами.

Итак, первый период существования буртасов на исторической арене в качестве политического объединения может быть ограничен второй половиной VIII — началом X в. Нужно, однако, оговорить, что целый ряд восточных географов XI—

В нем говорится о народах, живущих вдоль Волги, которая тогда называлась Итилем, и платящих ему дань. Народы эти таковы: «бурт-с» (буртасы), «булг-р» (булгары), «с-в-ар» (сувары), «арису» (мордва), «ц-р-мис» (черемисы), «в-н-н-тит» (вятичи), «с-в-р» (северяне) и др. Но эти сведения о границах хазарского каганата и окружающих его зависимых народах относятся ко времени былого могущества Хазарии, к VIII—IX вв.

Через два века этноним «буртас» вновь появляется в источниках. В «Слове о погибели русской земли» они упоминаются вместе с мордвой и черемисами как народы, впавшие в начале XII в. в зависимость от киевских князей. По сообще-

нию Рашид ад-Дина (1300—1310 гг.), золотоордынские ханы устроили в 1236—1237 гг. поход против буртасов. А в 1380 г. летопись перечисляет их в составе войск Мамай. В XVI—XVII вв. имя буртасов встречается в русских актовых документах: в Мордовском и Мещерском краях их считают пришлым населением, с которым связана и соответствующая топонимика. Эти источники характеризуют второй период существования буртасов — XI—XII вв.

Попытаемся наметить географические и культурно-хозяйственные ориентиры, указанные в сочинениях восточных географов, для локализации буртасов в первый период их истории.

ОТНОШЕНИЕ СТРАНЫ БУРТАСОВ К ИТИЛЮ

Обычно буртасов помещают на берегу Итиля. Такой подход к проблеме основан, однако, на материалах лишь одной группы письменных источников — сочинениях Истахри и Ибн-Хаукаля. Согласно первому автору, «буртасы — народ, соседящий с хазарами, нет между ними и хазарами другого народа; они люди, расположившиеся вдоль долины Атила», или Итиля. Ученик Истахри, Ибн-Хаукаль, пишет: «Восточный ее (реки Итиля. — Г.А.) край выходит из страны Хирхиз — протекает по землям, лежащим между каймаками и гузами, и служит естественной границей между ними. Далее она течет на запад за болгарами, затем поворачивает на восток, так что протекает через Рус, а затем через Болгарию (Волжскую Булгарию. — Г.А.); потом течет через Буртас, пока не впадет в Хазарское (Каспийское. — Г.А.) море». Эти географы по сравнению с другими дают самую незначительную и разбросанную информацию о буртасах.

Другая группа географов помещает страну буртасов в стороне от Итиля. В «Худуд ал-Алеме» конкретно указывается: «К востоку от них (буртасов. — Г.А.) — река Атил; к югу от них — хазары». Совершенно очевидно, что в данном случае источник ясно различает Итиль и расположенную к западу от него страну буртасов. Это же различие прослеживается и в рассказе Масуди о разгроме русов в 913 г.: «Около 5000 из них спаслись и отправились на судах (по Итилю. — Г.А.) в страну, примыкающую к стране Буртасов, где они оставили свои суда, и стали на суше; но из них кто был убит жителями Буртаса, а кто попался мусульманам в стране Бургар, и те убили их». В другом разделе своего

сочинения Масуди уточняет расположение страны буртасов: «Буртас... живет, как ранее упоминалось, на реке, названной по его имени», — причем эта река впадает в Итиль. Т. е. налицо противопоставление страны буртасов и Итиля. Итак, вторая группа источников помещает буртасов в стороне от этой реки — к западу от нее.

Сочинения Ибн-Русте, Гардизи, Баكري и Марвази составляют третью группу. В них страна буртасов описана значительно полнее. «Земля Буртасов лежит между Хозарскою и Болгарскою землями, на расстоянии пятнадцатидневного пути от первой», — пишет Ибн-Русте, а вслед за ним и остальные. Они не утверждают, что Итиль проходит через страну буртасов в отличие от Волжской Булгарии: «Болгарская земля смежна с землею буртасов. Живут болгары на берегу реки, которая впадает в море Хозарское и прозывается Итиль, протекая между землями Хозарской и Славянской».

Из приведенных отрывков видно, что сочинения первой группы вступают в противоречие по данному вопросу с сочинениями второй и третьей групп. Это противоречие усиливается различием в объеме сведений о буртасах: в трудах Истахри и Ибн-Хаукаля, повторим, они слишком незначительны. Сомнение в правоте этих авторов, размещающих буртасов непосредственно на берегах Итиля, вызывает и тот факт, что здесь же они помещают и русов, на деле живших гораздо западнее этой реки. По-видимому, связь буртасов с Итилем в трудах Истахри и Ибн-Хаукаля отражает не конкретную реальность. Это своего рода географический ориентир для Восточной Европы в целом. В таком же контексте следует читать и письмо хазарского царя Иосифа, в котором также на Итиле располагаются все подвластные ему народы, в том числе вятичи и северяне, тогда как первые, по археологическим данным, жили в бассейне Оки — на верхнем Дону, а вторые — на левобережье Днепра.

Поэтому страну буртасов мы должны искать к западу от Итиля.

ХОЗЯЙСТВЕННО-КУЛЬТУРНЫЙ ТИП БУРТАСОВ

Как же характеризуют источники хозяйственную жизнь буртасов? Ответ на этот вопрос имеет существенное значение для поисков того — к западу от Итиля-Волги — агроклиматического района, той географической среды, где они жили. Прежде всего, письменные источники указывают, что у буртасов было развито земледелие. «Зани-



Остатки юго-восточной стены Маяцкой крепости.

маются они и хлебопашеством», — пишет Ибн-Русте, а Бакри добавляет, что у них «обширные пашни». Эти сведения, конечно, еще не позволяют говорить о том, что земледелие у буртасов было ведущей формой хозяйства. Но сам факт, что упоминание о земледелии попало в труды восточных географов, свидетельствует о его значительной роли (особенно в контексте с сообщениями об отсутствии земледелия у соседей буртасов — русов, мадьяров и др.).

Важное место в хозяйстве буртасов отводится в письменных источниках животноводству. По Ибн-Русте и Гардизи, они владеют «верблюдами, рогатым скотом», а Бакри сообщает, что у них не только «большие стада рогатого скота», но «и овец». Важное добавление делает Марвази, утверждая, что, кроме рогатого скота, «они имеют свиней». Причем упоминание о свиньях стоит на первом месте, что сразу же характеризует буртасов не как кочевников-скотоводов, а как оседлых животноводов, населяющих южную часть лесостепной зоны, пограничной со степью.

Во многих сочинениях восточных

географов особо подчеркивается, что буртасы занимались бортничеством. Ибн-Русте, Бакри и Марвази отмечают, что «главное их богатство составляет мед», а Гардизи добавляет: «Плодов в этой стране нет, вино у них делается из меда». Известно, что пчеловодство в своем развитии прошло три основных этапа: дикое (бортевое), колодное и рамочное. Два первых этапа характерны для древнейших форм хозяйства. Причем бортничество непосредственно связано или с использованием дупел толстых деревьев, или с их выдалбливанием, что возможно только в лесной и лесостепной зонах. Таким образом, наличие бортничества также указывает, что буртасы жили в лесной или лесостепной зоне.

Существенной статьей дохода буртасов был пушной промысел. «Из страны буртас вывозят шкуры черных лисиц», — пишет Масуди, — представляющие самые ценные меха. Из них существуют несколько видов: бурые и белые, не уступающие в ценности собольему и песцовому... Черные лисьи меха не встречаются нигде в мире, кроме этой страны и соседних с нею стран. Неарабские цари стараются перещеголять друг друга роскошью шуб из этих мехов и делают из них шапки и шубы, так что

черные меха ценятся очень дорого. Вывозят их в Баб-ул-Абваб (современный Дербент.— Г.А.), Берда'а (город в Закавказье.— Г.А.) и прочие страны Хорасана. Часто вывозят их в северные страны славянских земель... а затем везут в земли Франции и Испании. Оттуда вывозят черные и красные лисьи меха в Магриб». Состав мехового экспорта буртасов состоял кроме лисиц из куниц, горностаев, соболей, белок, бобров; наличие всего этого зверя могло быть только в лесостепи.

Таким образом, по восточным источникам можно составить своеобразный перечень занятий буртасов — в порядке их значимости. Это, прежде всего, охота с целью добычи пушнины на экспорт, затем пчеловодство, животноводство и земледелие. Однако в такой именно градации можно усомниться. Ведь восточные географы делали акцент на то, что для них ново, непривычно и удивительно. Потому широкая слава буртасского мехового товара приводит к тому, что подсобное занятие ставится ими на первое место в хозяйстве. С другой стороны, южане, конечно же, замечают отсутствие плодов в этой стране, вследствие чего вино делается из меда, потому в их трудах пчеловодству и отведено второе по важности место. Но, как бы там ни было, хозяйственно-культурный тип буртасов можно определить как тип оседлых животноводов и земледельцев с развитыми подсобными промыслами — охотой и бортничеством. Такое хозяйство возможно только в лесостепной зоне. В степях его нельзя вести по многим причинам, в том числе — по уровню развития производительных сил того времени.

К западу от Волги расположены две физико-географические зоны — степь и лесостепь. Южная граница лесостепи между Днепром и Волгой проходит по линии Полтава — Балаклея — Валуйки — Россошь — Новохоперск — Саратов. Отдельные острова лесостепи в виде луговых и черноземных почв, широколиственных дубрав вклиниваются в степную зону по долинам рек Хопер, Бузулук и Медведица — левым притокам Дона. Очерченная территория характеризуется специфическим составом фауны, отличающимся от степной зоны: здесь — бобры, белки, горностаи, лисицы, куницы и т. д., т. е. те самые звери, пушнину которых добывали буртасы, согласно источникам.

Все это направляет нас на поиски археологических памятников буртасов в лесостепную зону к западу от Волги. И в этих поисках нам может помочь упоминаемая

у Масуди и Димашки река Буртас. Где она расположена? Явится ли дополнительным ориентиром в поисках страны буртасов?

ГДЕ НАХОДИТСЯ РЕКА БУРТАС?

Согласно Масуди, «хазары имеют челны, на которых они плавают из своего города вверх по реке, которая течет в их реку (Итиль.— Г.А.) из верхних мест и которая называется Буртас». Несколько далее он опять замечает: «Буртас... живет, как ранее упоминалось, на реке, названной по его имени»; это же повторяет и другой восточный географ — Димашки.

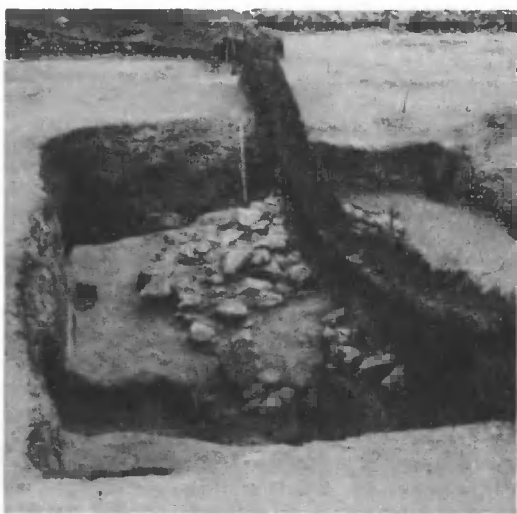
Действительно в юго-западной части современной Пензенской области течет речка с таким названием (впадает в Вышу — приток Цны). Но отождествление ее с рекой, о которой писал Масуди, было отвергнуто исследователями. Во-первых, она слишком мала для судоходства, а во-вторых, буртасская топонимика в этом районе позднего происхождения.

Из описания же Масуди — Димашки ясно, что речь идет о многоводной судоходной реке, западном притоке Итиля, а не Выши, который протекает по лесостепи. Но ни в среднем, ни в нижнем течении Волги между землями хазар и волжских болгар таких притоков нет. Вероятно, здесь следует вспомнить рассказ Масуди о протоке, соединяющей Волгу с Азовским морем: «Я же видел, что большая часть занимавшихся описанием морей из древних и новых упоминают в своих сочинениях, что рукав Константинии, выходящей из Майотаса, соединяется с Хазарским морем; но я не знаю, как это возможно и откуда они это взяли, путем ли собственного наблюдения, путем ли умозаключения и сравнения».

И продолжает: «В верховьях хазарской реки есть устье, соединяющееся с рукавом моря Нейтас, которое есть Русское (Азовское.— Г.А.) море; никто, кроме них, не плавает по нем, и они (русы) живут на одном из его берегов». В свое время было замечено, что это — ошибочное — мнение Масуди, разделяемое и другими арабскими географами, будто рукав Волги соединяется с рукавом Азовского моря или Доном, имеет источником то обстоятельство, что с самых ранних времен судам и ладьям, плававшим по Волге и Дону, небольшое расстояние между этими реками никогда не служило препятствием: их перетаскивали волоком через сушу. Эту же идею проводит в настоящее время Б. А. Рыбаков, отмечая, что при отсутствии надежной топографии наезжен-



Остатки хозяйственной постройки на каменном цоколе в Маяцком городище.



Остатки котлована жилища-полуземлянки в Маяцкой крепости.

ная переправа из Дона в Волгу создавала у арабских географов впечатление об их слиянии — Дон воспринимался как правый приток Волги.

В таком случае правомерен вопрос об отождествлении реки Буртас с Доном, который в районе Калача-на-Дону так близко подходит к Волге, что информаторы Масуди вполне могли принять его за правый приток Итиля.

«ОТКУДА ЕСТЬ ПОШЛИ» БУРТАСЫ

Итак, для локализации буртасов первого периода их существования второй половины VIII — начала X в. есть следующие ориентиры: их археологические памятники должны находиться западнее Волги в южной части лесостепной зоны, точнее, в бассейне Дона.

Археологические культуры этого периода в лесостепной зоне Восточной Европы выявлены достаточно хорошо. К северу от Саратова, по обоим берегам Волги между устьями Черемшана и Камы, расположены памятники волжских булгар. К западу, в бассейне Цны и Мокши, в междуречье Суры и Оки, расположены памятники мордвы, или, как их называет царь Иосиф, арису. Лесостепная зона Днепровского левобережья вплоть до Северского Донца занята роменской культурой северян. В бассейне верхнего Дона сосредоточены памятники боршевской культуры вятичей.

По южной кромке лесостепной зоны в бассейне Дона и островкам лесостепи в речных долинах левых его притоков, между памятниками роменской культуры и мордвы жили в середине VIII — начале X в. аланы, которых относят к салтово-маяцкой культуре. Это полностью соответствует ориентирам, которые мы выделили для локализации буртасов. По характеру находок и поселений аланские памятники, расположенные в этом месте, нельзя спутать ни с какими другими.

Открытие в конце XIX в. салтово-маяцкой культуры явилось значительным событием в изучении древностей Восточной Европы. С самого начала исследования Верхне-Салтовского катакомбного могильника на Северском Донце и Маяцкого городища на Дону, а позже — аланского (лесостепного) варианта этой культуры, среди ученых возникла дискуссия об этнической принадлежности ее носителей. Ряд ученых (А. А. Спицын, Ю. В. Готье), указывая на сходство открытых памятников с аланскими древностями Северного Кавказа, видели в носителях салтово-маяцкой культуры алан. Другие (Д. Я. Самоковасов, Д. И. Багaley, В. А. Бабенко) полагали, что эта культура принадлежала хазарам. Высказывались предположения о связи некоторой части носителей этой культуры с венграми или шведами.

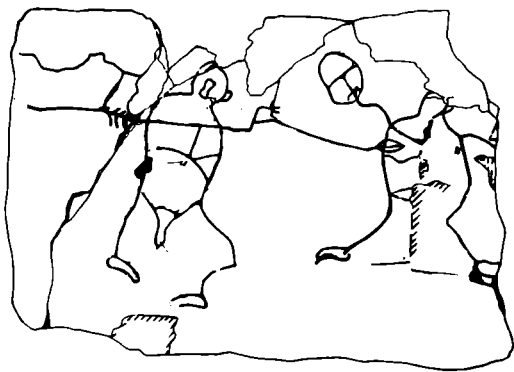
Ныне, благодаря исследованиям М. И. Артамонова, Н. Я. Мерперта, И. И. Лапушкина и С. А. Плетневой, выясняется, что салтово-маяцкая культура неоднородна и

состоит из нескольких местных вариантов, в той или иной степени связанных с определенными этносами и характеризующих в целом культуру населения хазарского каганата. Сейчас уже не подлежит сомнению, что в основе формирования ее лесостепного варианта лежит аланская культура Северного Кавказа.

Первые известия об аланах в Северном Причерноморье и на Северном Кавказе появляются в письменных источниках I в. в сочинениях Плиния Секунда и Дионисия. Почти в то же время рядом с аланами упоминаются язиги, язаматы, яксаматы — вероятно, предки средневековых асов, входившие в единую с аланами этнолингвистическую общность. После разгрома аланов гуннами в 372 г. часть аланов, пройдя Европу, достигла Северной Африки, другая осталась на Северном Кавказе. В середине I тысячелетия начинается процесс формирования аланского народа, составной частью которого были асы. Этот этноним сохраняется на Северном Кавказе и в последующие века. В «Армянской географии» VII в. говорится о народе аланов-аштигор; грузинские источники называют их овсы или оси; персидские, арабские, византийские и китайские — асами; русская летопись — ясами; венгерские документы — яз-ок и т. д. Исследователи предполагают, что соотношение названий аланы и асы — это соотношение общего и частного в единой этнолингвистической общности. Видимо, поэтому венецианский торговец и дипломат Иосафат Барбаро, рассказывая о путешествии в Тану, в низовья Дона, в 1436 г., говорит, что «Алания заимствовала свое имя от народа Аланского, называвшего себя на своем языке Ас. Народ сей, исповедовавший христианскую веру, был истреблен и выгнан из жилищ своих татарами».

В середине VIII в. некоторые племена северокавказских алан-асов мигрируют из предгорной зоны Северного Кавказа на север, в бассейн Среднего Дона. Этот процесс достаточно хорошо фиксируется как на Северном Кавказе, где в середине VIII в. оказались заброшенными большая группа аланских катакомбных могильников и поселения (в частности, в районе современного Кисловодска), так и в лесостепной зоне Донецко-Донского междуречья, где в это же самое время появились те самые характерные катакомбные могильники и поселения; они и получили название аланского варианта салтово-маяцкой культуры.

В последние годы интерес к этим памятникам значительно усилился. Обследование бассейна Среднего Дона позволило



Ритуальные танцы. Рисунок на блоке из стены Маяцкой крепости.



Звери и птицы. Рисунок на костяном горлышке бурдюка.

более четко выделить территорию, занятую в VIII—X вв. племенами — носителями салтовской культуры в лесостепи. Широкие работы по исследованию Маяцкого городища развернула Советско-Болгаро-Венгерская экспедиция Института археологии АН СССР.

Маяцкое городище, раскопки которого ведутся с 1975 г., расположено на высоком правом берегу Дона у места впадения в него реки Тихая Сосна. Центральным элементом комплекса является белокаменная крепость трапециевидной формы площадью 0,93 га. Первоначальная толщина стен, сложенных из меловых блоков, достигала 6 м, а высота — 5 м. Вершину стены венчал зубчатый парапет и валганг (площадка) для стрелков. Крепостные стены с трех сторон окружал глубокий ров с перемычкой для дороги напротив ворот. С четвертой стороны подход к укреплению защищал крутой склон Дона. Внутри крепости выделялся огороженный дополнительной стеной участок площадью 0,19 га, где были раскопаны административные, жилые и хозяйственные постройки. На стенах крепости обнаружены многочисленные рисунки, среди которых изображения лошадей, верблюдов, оленей, сцены битвы всадника и пешего лучника, а также надписи, сделанные одной из разновидностей рунической графики. Крепость представляла собой крупный феодальный замок, поставленный на границе с землями донских славян и контролировавший водный путь по Дону из Хазарского домена.

Рядом с городищем располагалось обширное селище с плотной застройкой. Археологи раскопали остатки жилых строений полуземляночного типа. Их нижняя часть была значительно углублена в землю или материковую скалу. Стены верхней части строились в виде сруба. В центре такого «однокомнатного» жилища располагался очаг, а в одном из углов иногда устраивался пристенный камин. В таких сооружениях жили, как правило, в зимнее время. В летнее для жилья использовали более легкие постройки, слегка углубленные в землю, чем-то напоминающие юрты кочевников. Рядом с домами находились хозяйственные сооружения: глубокие подвалы-погребы, ямы колоколовидной формы для хранения зерна, легкие постройки для молодняка. Жилища располагались на территории селища «гнездами» — усадьбами родственных коллективов. В состав таких усадеб входили и культовые сооружения — семейные святилища огня, окруженные небольшими семейными кладбищами и погре-

бениями животных, заколотых в ритуальных целях.

На окраине селища, несколько в стороне от основной массы построек, находился хуторок гончаров. Он состоял из мастерской, размещенной в четырех отдельных полуземлянках, где были установлены гончарные круги, сушилки и четыре двухъярусные печи для обжига посуды. Здесь были найдены кухонные горшки, подвесные котлы для варки пищи, лощеная столовая посуда и крупные пифосы для хранения припасов.

С противоположной стороны к селищу примыкал катакомбный могильник с одиночными и парными захоронениями. Похороны обычно сопровождался тризнами и ритуальными погребениями животных. К сожалению, большая часть погребений оказалась разграбленной в древности, поэтому непогребенные захоронения редки. Но и то, что удалось собрать после грабителей, свидетельствует о высоком уровне культуры жившего здесь населения: разнообразие бронзовых и серебряных поясных наборов воинов, богато украшенная конская сбруя с упряжью, золотые серьги, бусы, доставленные из малоазиатских провинций Византии и т. д. Найденная в погребениях столовая посуда как две капли воды похожа на сосуды, изготавливаемые в то время северокавказскими аланами, что еще раз свидетельствует о «генетической» связи культуры буртасов, оставивших этот могильник, с аланской культурой Северного Кавказа.

ЭТНОНИМ «БУРТАС»

Важной частью проблемы является объяснение этнонима «буртас». У Истахри этот термин применяется в двух значениях: как название этнической общности и как название страны. Третье значение термина приводит арабский географ Йакут: буртас — название города. Исследователи пришли к выводу, что этноним «буртас» является самоназванием города; для его объяснения, как правило, ученые используют сообщения Истахри и Ибн-Хаукаля: «Язык булгар походит на язык хазар, у буртасов — другой язык, равно как язык русов — не язык хазар и буртасов». Это сообщение восточных географов позволяет исключить из дешифровки этнонима тюркские (булгарский и хазарский) и славянские языки. С другой стороны, предложенная связь буртасов с аланской этнолингвистической общностью дает основание производить это название из иранских язы-

ков. Разнообразие графических форм термина «буртас» в арабо-персидской письменности показывает, что название буртасов не укладывается точно в арабскую графическую систему, и весьма вероятно, что это, некогда изображенное арабской графикой имя, звучало несколько иначе, чем русское «буртас». Возможно, что первоначальной формой этого термина было написание, встречающееся у Бакри, — «фурдас». Такой этноним встречается даже в начале XVII в. — персидский историк Рази знает народ фуртасов. Если предположить, что данное племенное название сложносоставное из двух частей — фурт (бурт) и ас, то первую часть можно перевести с иранских языков как «сын» (санскритское «путра», скифское «фурт», осетинское «фырт», персидское «пур» и т. д.). Некоторые различия в написании первой (п — ф) и третьей (т — д) согласных соответствуют фонетическим особенностям осетинского языка, по которым древнеиранскому «п» в осетинском языке тождественно «ф», а звук «т» может переходить в «д». Вторая часть этнонима — ас — известное подразделение аланской этнолингвистической общности. Поэтому этноним «фурт-ас» вполне можно перевести как «сын асский». Определение, стоящее позади определяемого слова, отражает древний синтаксис осетинского языка, что наглядно иллюстрируется такими словами, как батыр-ас — богатырь асский или сари-ас — вождь асский. Нелишне вспомнить, что сложносоставные этнонимы с элементом «ас» встречаются в арабо-персидской географической литературе X в., и это связано с упоминанием аланской этнолингвистической общности. Например, Ибн-Русте упоминает главенствующее аланское племя рухс-ас, что означает «светлые асы», чьи генетические корни восходят к роксаланам, а также народ тул-ас, в котором одни ученые видят туальцев Южной Осетии, другие же полагают, что это собственное имя — так звали аланского князя Дула.

Таким образом, новое осмысление восточных письменных источников, рассказывающих о буртасах, и новые археологические исследования в бассейне Среднего Дона позволяют связать с буртасами памятники аланского варианта салтово-маяцкой культуры, расположенные в лесостепной зоне. Предложенная локализация страны буртасов полностью соответствует информации о территориальных и политических связях буртасов с хазарами, о чем писал Марвази: «Им (хазарам. — Г.А.) принадлежат буртасы, чья территория является

частью хазарской территории. Между этими двумя народами 15 дней пути. Они (буртасы. — Г.А.) подчиняются царю хазар и выставляют ему 10 000 всадников». Это соответствует и сложившемуся в настоящее время представлению о салтово-маяцкой культуре как культуре хазарского каганата. Вместе с тем очевиден и степной характер территории, лежащей между хазарами и буртасами, описанный Гардизи: «Вся местность между их (буртасов. — Г.А.) владениями и страной хазар представляет равнину». Это — степи нынешних Ворошиловградской и Волгоградской областей. Более того, предложенный вариант объяснения этнонима «буртас» раскрывает реально выраженную этногенетическую связь буртасов лесостепной зоны бассейна Среднего Дона с общностью алан-асов Северного Кавказа.

В начале X в. памятники лесостепного варианта салтово-маяцкой культуры прекращают существование. Причины этого явления окончательно не ясны. Одни полагают, что алано-асское население этого региона было разгромлено хазарами в наказание за восстание, поднятое против каганата. Другие связывают исчезновение этих памятников с нашествием печенегов. Третьи — с началом широкой славянской колонизации на Нижнем Дону. Однако совершенно очевидно, что какая-то часть буртасов продвинулась на территорию мордвы и мещеры на Средней Волге, где их упоминают источники вплоть до XVII в.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Заходер Б. Н. КАСПИЙСКИЙ СВОД СВЕДЕНИЙ О ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЕ. Горган и Поволжье в IX—X вв. М.: Изд-во восточной литературы, 1962.

МАЯЦКОЕ ГОРОДИЩЕ. Труды Советско-Болгаро-Венгерской экспедиции. М.: Наука, 1984.

Minorsky V. Hudud al-Alam. THE REGIONS OF THE WORLD. L., 1970.

Golden P. KHAZARS STUDIES. An historico-philological inquiry into the origins of the Khazars. Budapest, 1980.

Принцип дополнительности в описании психических явлений

И. М. Фейгенберг



Иосиф Моисеевич Фейгенберг, доктор медицинских наук, профессор Центрального института усовершенствования врачей. Занимается научными проблемами на стыке физиологии, психологии, педагогики. Автор ряда монографий, в том числе: *Вероятностное прогнозирование и преднастройка к движениям* (совместно с В. А. Иванниковым). М., 1976 — и научно-популярных книг: *Мозг. Психика. Здоровье*. М., 1972; *Проблемные ситуации и развитие активности личности*. М., 1981.

ФЕНОМЕН: ВИДИТ ИЛИ НЕ ВИДИТ ИЛИ НЕЧТО ТРЕТЬЕ

Начнем с рассказа об эксперименте, описание результатов которого наталкивается на некоторые трудности¹. В гипнотическом сеансе человеку внушается, что он не видит одним (например, левым) глазом. Известно, что в обычных условиях человек не различает, каким (правым или левым) глазом он видит тот или иной объект, если различие изображений объектов на сетчатке касается их формы и цвета². Чтобы убедиться в эффективности внушения, перед правым глазом испытуемого помещают ладонь, закрыв ею все поле зрения; при успешном внушении испытуемый сообщает, что ничего не видит. Убедившись с помощью этой «пробы с ладонью», что внушение подействовало и человек не видит левым глазом, переходят ко второй пробе — «пробе с поляроидами». Испытуемому надевают очки, в которые вставлены

поляризационные светофильтры. Плоскости поляризации у фильтров, стоящих перед правым и левым глазом, взаимно перпендикулярны. Испытуемый не знает о наличии в очках этих фильтров и воспринимает их как обычные летние солнцезащитные очки.

Испытуемому сообщают, что после предупреждения («внимание!») на экране появится на некоторое время (около одной секунды) многозначное число или слово, которое он должен прочесть. Цифры или буквы слова появляются в поляризованном свете, так что свет от одних цифр или букв пропускается только поляризационным фильтром правого глаза, от других — только фильтром левого глаза, от третьих — обоими фильтрами. Так, например, в появляющемся числе 8325 свет от цифры 8 попадает только в правый глаз, от цифры 3 — в оба глаза, от 2 — в правый, от 5 — в левый. Таким образом, световой сигнал от цифры 5 физически попадает только в левый глаз — т. е. в тот глаз, которым испытуемый в результате внушения ничего не видит в «пробе с ладонью».

Аналогично этому, в слове *матрос* буквы *м* и *а* поляризованы так, что свет от них не попадает в правый глаз. От остальных букв свет попадает на сетчатку правого глаза или обоих глаз. Опыт показывает, что при некоторой, достаточно глубокой степени гипноза испытуемые читают

¹ Фейгенберг И. М. — Доклады АН СССР, 1980, т. 235, № 2, с. 500.

² Фейгенберг И. М. — *Вопр. эксперим. биол. и мед.*, 1951, № 1, с. 12; Он же. — *Пробл. физиол. оптики*, 1953, т. 8, с. 230; *Idem. Funktionelle Verbindungen der sensorischen Systeme (in Norm und Pathologie)*. Stuttgart, 1972.

число 8325 или слово матрос, а не 832 или трос. Слова специально подбирались так, чтобы остаток слова сам был полным словом.

Таким образом, «проба с поляроидами» дает результат, отличный от результата «пробы с ладонью»: в «пробе с ладонью» испытуемый не видит левым глазом, а в «пробе с поляроидами» — видит. Естественно спросить: так видит ли он на самом деле? Ответить на этот вопрос невозможно ни утвердительно, ни отрицательно. Неясно, что значит «видеть на самом деле». Ни ответ «видит», ни — «не видит» не дает правильного описания явления. Любой из этих двух ответов может быть тут же опровергнут одной из двух описанных проб.

Подбор слов для описания наблюдаемого явления оказывается весьма сложным. Ведь согласно «обыденному смыслу» человек может видеть или не видеть — третьего не дано.

«Обыденному смыслу» результаты «пробы с ладонью» и «пробы с поляроидами» представляются на первый взгляд противоречивыми. Но так ли это? К ответу на этот вопрос мы вернемся ниже.

НЕСЛУЧАЙНОСТЬ ФЕНОМЕНА

Представляет ли собою описанный выше феномен нечто случайное или исключительное в широком круге психических явлений? Возникают ли еще где-либо в психологии такого же рода трудности в описании и трактовке наблюдаемых фактов, противоречия с «обыденным смыслом»? Да, психология богата такими явлениями. С подобной трудностью понимания наблюдаемых явлений исследователи сталкивались давно. Пациентке в состоянии гипноза внушено, что она собирает цветы на лугу. Она нагибается, рвет цветы, рассматривает их, нюхает, складывает в букет. Она видит луг с цветами и не видит обстановки врачебного кабинета. Но при этом она не наталкивается на столы и стулья. Так видит ли она «на самом деле» мебель в кабинете врача? Ни «да», ни «нет» не будет правильным ответом.

Пациенту внушено, что он не видит ключа среди множества предметов. Он по просьбе врача собирает в кучу все предметы, лежащие на столе, но не трогает ключа, тоже лежащего на столе. Так видит ли он ключ? Ведь чтобы не видеть ключа, он должен опознать этот предмет как ключ, а стало быть, увидеть его. Но сказать «видит» неверно: пациент всем своим поведением показывает, что не видит ключа.

Развивая интересные опыты Е. Эванса и У. Торна³, Ф. В. Бассин и В. Е. Рожнов описывают такое явление⁴. Испытуемому, погруженному в гипнотический сон, внушается, что среди карточек, на каждую из которых нанесены математические выражения, он не будет видеть ту, на которой после выполнения указанных в ней действий получается число 6. Карточку, на которой изображено математическое выражение $\frac{3\sqrt{16}}{2}$,

испытуемый «не видит». Но ведь, чтобы не видеть, он должен был увидеть и произвести соответствующие математические действия.

«Обыденный смысл» человека с трудом мирится с описанием явления, о котором неверно сказать «видит», но и неверно сказать «не видит». Несмотря на двухсотлетнюю (если считать от Ф. Месмера) историю научного изучения гипноза, до сих пор спектр теорий этого явления очень широк — от отрицания самого существования гипноза до подкупающих своей кажущейся простотой некоторых физиологических теорий (гипноз — это парциальное торможение коры мозга).

Среди ученых нашей страны до самого недавнего времени твердо господствовала физиологическая теория: полагалось, что гипноз — это «частичный, или парциальный, сон, считая внутреннее торможение и сон одним и тем же процессом»⁵. Думали, что в основе гипноза лежит процесс торможения, захватывающий кору больших полушарий головного мозга; торможение это носит дробный характер, распространяясь на разных участках мозга на различную глубину. Гипнотическое внушение выпадения тех или иных функций особенно привлекательно трактовать как торможение соответствующих этим функциям участков коры мозга. Действительно, внушение анестезии левой руки соблазнительно рассматривать как торможение соответствующей зоны коры головного мозга в области задней центральной извилины справа, где «локализуется» чувствительность левой руки, а внушение невозможности произвольно пошевелить левой рукой — как парциальное торможение участка передней центральной из-

³ Evans E., Thorn W. E. — Intern. J. Clin. Exp. Hypn., 1966, v. 14, p. 162.

⁴ Бассин Ф. В., Рожнов В. Е. — Вопр. философии, 1975, № 10, с. 94.

⁵ Буль П. И. Основы психотерапии Л., 1974, с. 57.

вилины справа, где «локализуется» моторика левой руки. Внушенная в гипнозе слепота, с этой точки зрения, — парциальное торможение зрительной области коры мозга.

Но морфология и физиология зрительной системы человека дают нам возможность проверить такую гипотезу. Неполный перекрест зрительных нервов приводит к тому, что в коре головного мозга, по-видимому, нет структур, связанных только с правым или только с левым глазом⁶. Правда, в подкорковом зрительном центре — наружном колленчатом теле — еще сохраняется раздельное представительство правого и левого глаз. Но предметное зрение, различение форм и цветов осуществляется корковым центром. Да и теория гипноза как парциального торможения предполагает именно корковое торможение. Может быть, природа гипноза теснее связана не с физиологическим торможением, а с психологической перцептивной установкой?

Если бы природа гипноза сводилась к парциальному торможению тех или иных корковых зон, то было бы невозможно вызвать в гипнозе слепоту одного глаза — правого или левого — при сохранении зрения другим глазом: не существует корковых структур, торможение которых привело бы к выключению одного глаза. Между тем внушенная слепота одного глаза легко достигается в гипнотическом сеансе. Уже этот факт заставляет усомниться в том, что явление гипноза сводится к парциальному корковому торможению. Физиологическая сторона гипноза нуждается еще в исследовании.

Трудности описания многозначных психологических явлений, их столкновение с «обыденным смыслом» присущи не только изучению гипноза. Интроспективное исследование⁷ неосознаваемых явлений наталкивается на то, что всякая попытка субъекта осознать бессознательные психические феномены неизбежно и немедленно изменяет протекание изучаемых явлений.

Наблюдение бессознательных психических явлений со стороны, другим субъектом («объективное» наблюдение) связано с другими трудностями. Так, оказывается, что различные способы наблюдения приводят к различным суждениям о наблюдаемом. Примером могут служить эксперименты, проведенные в свое время

М. М. Бонгардом и М. С. Смирновым. Они исследовали остроту зрения с помощью кольца Ландольта (ширина разрыва кольца равна диаметру его ободка): испытуемый должен был указать, в какую сторону направлен разрыв кольца. При достаточном удалении кольца от субъекта последний заявлял, что больше не видит разрыва кольца. Тогда испытуемому давали в руку вращающуюся стрелку и просили его направлять стрелку так, чтобы она смотрела в сторону разрыва кольца. Если он не видит разрыва, пусть направляет стрелку наугад. Оказалось, что в ситуации, когда испытуемый заявляет, что не видит разрыва, совпадения направлений разрыва и стрелки значительно превышали случайную величину. Итак, один метод наблюдения — опрос, при котором испытуемый может сказать, что «не видит», куда направлен разрыв, — приводит к заключению, что испытуемый не видит разрыва кольца. Другой же метод наблюдения — когда испытуемый лишается возможности отказаться от ответа на вопрос о направлении разрыва кольца (он же не может направить стрелку «никуда») — приводит к выводу, что он все-таки видит разрыв кольца.

Таким образом, трудности в описании феномена «видит или не видит или нечто третье» не случайны. Психология знает множество сходных явлений, при изучении которых нельзя говорить о результате наблюдения, не описав способы наблюдения. Различные способы наблюдения дают различные и притом нередко взаимно противоречивые результаты.

ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОСТЬ ПСИХИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ?

Является ли такая ситуация присущей только области психических явлений? Нет, психические явления не являются в этом смысле исключением.

С подобной же трудностью в описании некоторых явлений, с противоречием между эмпирическими фактами и «обыденным смыслом», столкнулось естествознание при изучении неживой природы — в области квантовой механики.

В описании явления неизбежно отражаются знания и представления описываемого явления субъекта, возникшие на основе предшествующего опыта. Так, субъект говорит, что наблюдает при таких-то условиях повышение силы тока в электрической цепи или усиление излучения, между тем как непосредственно он наблюдает

⁶ См. упом. соч. автора 1953 и 1972 гг.

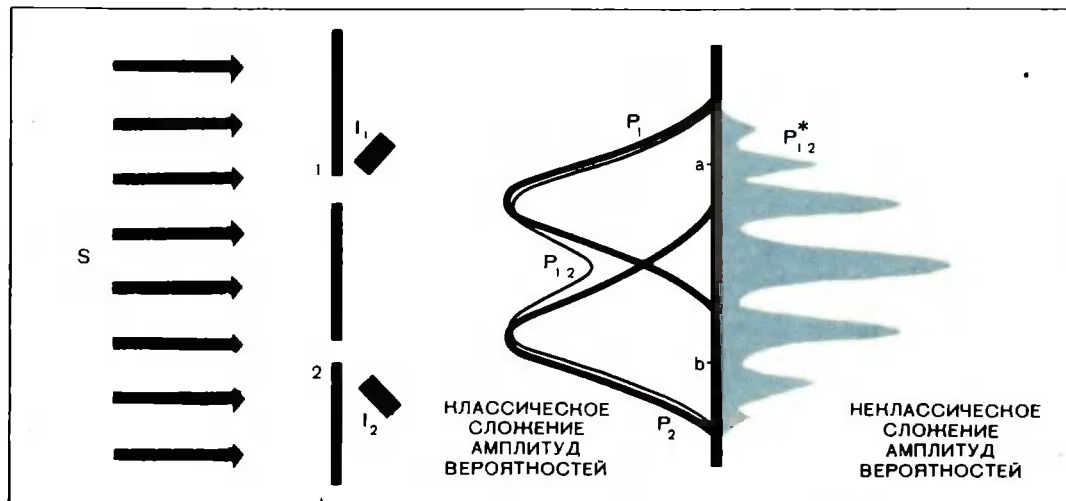
⁷ Исследование методами самонаблюдения.

отклонение стрелки амперметра или учащение щелчков счетчика Гейгера: субъект знает, что именно отражают такие изменения положения стрелки или частоты щелчков.

При описании наблюдаемого явления субъект неизбежно (хотя и совсем не обязательно сознательно) исходит из известных ему принципов, представлений, знаний, стремится представить себе наблюдаемое явление посредством чего-то уже знакомого.

знании с появлением в поле зрения исследователей квантово-механических явлений.

Сложность осмысления и описания явлений, оказавшихся объектом исследования — элементарных частиц, можно ясно увидеть, вспомнив один из кардинальных опытов квантовой физики. Из некоторого источника S испускаются элементарные частицы, например электроны (см. рисунок). На их пути стоит непроницаемый для них экран с двумя щелями (1 и 2). Частицы испускаются не слишком часто, так что



Опыт с прохождением элементарных частиц через щели. Если открыта только щель 1 в первом экране, то распределение частиц, попавших на второй экран, соответствует кривой P_1 . Если открыта только щель 2, то частицы распределяются соответственно кривой P_2 . Если же открыты обе щели, то распределение элементарных частиц соответствует не кривой $P_{1,2}$ (как было бы, если бы летели не микро-, а макрочастицы), а кривой $P_{1,2}^*$ (наблюдается явление интерференции). Если же поставить индикаторы I_1 и I_2 , которые фиксируют, через какую щель пролетела каждая частица, то интерференция исчезает и частицы ведут себя как макротела в классической физике [кривая $P_{1,2} = P_1 + P_2$].

для любых двух электронов всегда удастся установить, какой из них вылетел раньше. Направление, по которому летит электрон, является случайным. Только попавшие в щель первого экрана электроны могут проникнуть за этот экран и попасть на второй экран. Если открыта только щель 1, то больше всего электронов попадает на второй экран прямо против этой щели; чем дальше от щели, тем меньше электронов попадает в это место экрана. Распределение вероятности попадания электронов на различные участки второго экрана при открытой щели 1 изображено кривой P_1 . Если открыть только щель 2, то такое же распределение вероятности попадания электронов будет с максимумом против щели 2 (кривая P_2).

Что же будет, если открыть одновременно обе щели?

«Обыденный смысл» подсказывает следующее. Электрон может попасть на второй экран только предварительно пройдя или через щель 1 или через щель 2;

Но новое явление не может быть понято и описано с помощью уже известных субъекту принципов и законов. Создается видимость безвыходного противоречия, несоответствия «обыденному смыслу», сформированному всем прошлым опытом — индивидуальным и коллективным. Именно такая ситуация возникла в естество-

любой третий вариант исключен. Распределение попадания электронов на второй экран будет равно сумме распределений для случаев, когда открыта только щель 1 или только щель 2; $P_{12} = P_1 + P_2$. Именно так было бы при подсчете вероятности попадания камней, если бы мальчишки обстреливали из рогатки с улицы комнату с двумя открытыми окнами.

Но электроны (или любые другие элементарные частицы) ведут себя не так. Распределение их попаданий на второй экран не похоже на кривую P_{12} . Оно происходит так, как показано на кривой P'_{12} , что характерно для интерференции. Ясно, что $P'_{12} \neq P_1 + P_2$. Такое распределение кажется удивительным. Как могло случиться, что в точку а попало больше электронов, чем число электронов, попадающих сюда из числа прошедших щель 1, в то время как при открытии одной щели 2 электроны сюда вообще не попадают? Каким путем пришли сюда эти «избыточные» электроны?

Посмотрим на точку b: при двух открытых щелях сюда почти не попадает электронов. Но ведь когда открыта только щель 1, сюда попадает довольно большое число электронов. Каким же путем они летят, если открыта еще и щель 2?

Попытаемся проследить — через какую щель (1 или 2) прошел каждый электрон, попавший на второй экран. Для этого поставим за щелями 1 и 2 индикаторы (I_1 и I_2), которые будут регистрировать прохождение каждого электрона через щель. Эти индикаторы представляют собою источники света (фотонов), «освещающего» пролетающие электроны. Каждый раз, в полном соответствии с «обыденным смыслом», срабатывает только один индикатор: электрон проходит либо через щель 1, либо через щель 2. Но вот распределение попаданий электронов на второй экран соответствует теперь не кривой P'_{12} , а сумме кривых P_1 и P_2 . Электроны, летящие через щель 1, попадают на второй экран точно так, как было бы, если бы была открыта только щель 1. Точно так же электроны, прошедшие через щель 2, распределяются на втором экране так, как было бы, если бы открытой была только щель 2.

При наличии индикаторов, определяющих, через какую щель прошел электрон, получается классическая картина, без интерференции. При отсутствии же индикаторов интерференция есть, но невозможно сказать, через какую щель прошел электрон.

Итак, само наблюдение меняет ход электронов между первым и вторым экраном. Электроны, как и любые другие элементарные частицы, невозможно наблюдать, не изменяя траектории их полета. Если при изучении макрообъектов в классической физике одним из основных требований было использование такого метода наблюдения или измерения явления, который не меняет протекания наблюдаемого процесса, то при переходе к изучению микрообъектов (элементарных частиц) оказалось, что не существует методов наблюдения, не изменяющих ход наблюдаемого явления. Наблюдаемое явление и наблюдатель со всей совокупностью средств наблюдения составляют один неразрывный комплекс.

Но вернемся к опыту с двумя щелями. Через какую щель пролетает электрон, когда нет индикаторов, регистрирующих его прохождение? Казалось бы, через ту же, через которую он пролетит и при наличии индикатора: ведь индикатор стоит (и может повлиять на путь электрона) после щели, а то, в какую щель попадет электрон, определяется его траекторией на участке от источника до щели, т. е. раньше, чем в ход процесса может вмешаться влияние индикатора. Но тогда кажется совершенно непонятным, почему путь электрона, который прошел через щель 1, зависит (при отсутствии индикаторов!) от того, открыта или закрыта щель 2 (вспомним, например, точку b, куда электроны почти перестают попадать при обоих открытых щелях).

Итак, поток электронов через экран с двумя щелями не может быть описан как движение привычных нам частиц или тел: обнаруживается интерференция, вероятность попадания электронов на второй экран при двух щелях не равна сумме вероятностей для каждой отдельно открытой щели. Эти черты роднят поток элементарных частиц с волной.

Создается трудная для «обыденного смысла» ситуация. Р. Фейнман пишет в связи с этим:

«Сказать, что они (электроны или свет) ведут себя как частицы, значило бы создавать у вас неправильное представление. То же самое получится, если я скажу, что они ведут себя как волны. Они ведут себя таким образом, что это ни в коей степени не напоминает чего-нибудь, с чем вы сталкивались раньше. Ваш опыт, основанный на том, с чем вы сталкивались раньше, неполон. Просто-напросто все то, что происходит в очень маленьком масштабе, происходит совсем по-другому. Атом не подчиняет-

ся тем же законам, что и грузик, подвешенный на пружинке и колеблющийся на ней. Его нельзя также рассматривать как миниатюрную солнечную систему с крошечными планетами, вращающимися по орбитам. Нельзя его представить и в виде какого-то облака или тумана, окутывающего ядро. Просто он не похож на все, что вы видели до этого. Трудность здесь чисто психологическая — нас постоянно мучает вопрос «Как же так может быть?», в котором отражается неконтролируемое, но совершенно обоснованное стремление представить себе все посредством чего-то очень знакомого»⁸.

Итак, не только в области психологии, но и при изучении неживой природы исследователи сталкиваются с явлениями, противоречащими «обыденному смыслу», — с такими явлениями, которые невозможно описать, не указав способ наблюдения: различные способы наблюдения дают различные результаты.

ПСИХОЛОГИЯ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА (ЧЕРТЫ СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ)

Выход из этой трудной ситуации в физике был найден Нильсом Бором, сформулировавшим в 1927 г. принцип дополнительности, согласно которому при изучении микрообъектов (элементарных частиц) разные способы наблюдения дают различные результаты. Эти результаты следует рассматривать не как противоречивые, а как дополнительные: истина в том и состоит, что при одних условиях наблюдение дает один результат, при других — иной результат. Описание явления будет полным только тогда, когда будут проведены оба наблюдения, дополняющие друг друга.

В квантовой физике объект наблюдения стал столь малым, что наблюдать его, не повлияв на ход наблюдаемого, было невозможно; здесь наблюдаемое и средства наблюдения составляют единый комплекс, и невозможно четко и однозначно провести границу между ними.

Но ведь подобная ситуация существует в психологии: хотя и по совсем иным причинам, здесь тоже невозможно устранить влияние наблюдателя на наблюдаемое, особенно в том случае, когда «наблюдателем» является сознание того субъекта, над которым ведется наблюдение.

В истории психологии было несколько попыток создать «объективную» психоло-

гию, построенную по образцу классических точных наук, что включало требование: вести наблюдение так, чтобы оно не влияло на наблюдаемое явление. Такими попытками были психофизика Г. Фехнера, бихевиоризм Дж. Уотсона, учение о высшей нервной деятельности И. П. Павлова в интерпретации некоторых его последователей. Каждое из этих направлений много дало науке, но ни одно из них не привело к созданию «объективной» психологии. И, возможно, причина в том, что в психологии невозможно радикально и окончательно отделить наблюдаемое от наблюдающего сознания самого субъекта (объекта наблюдения психолога). Задача исследователя состоит не в том, чтобы элиминировать сознание субъекта из обстановки эксперимента, а в том, чтобы найти такой способ описания наблюдаемых явлений, при котором сознание не было бы «помехой» наблюдению. Здесь-то и возникает мысль об аналогии с неклассической физикой: там тоже возникла ситуация неразрывности наблюдаемого и наблюдателя. В физике был разработан и способ описания таких явлений, и соответствующий математический аппарат; в частности, было введено понятие амплитуды вероятности.

Вернемся теперь к феномену «видит или не видит или нечто третье». Однозначного ответа там нет. Феномен допускает лишь дополнительное описание: при одном способе наблюдения («проба с ладонью») субъект не видит, при другом способе наблюдения («проба с поляроидами») — видит. В одном и том же опыте субъект не может осознать и то, каким глазом он видит, и то, что именно видит «загипнотизированный» глаз. В «пробе с ладонью» субъект точно знает, каким глазом он смотрит, а в «пробе с поляроидами» он этого не знает. Этот феномен может быть описан только дополнительностным образом.

Если принять точку зрения, что в вопросе об отношении наблюдаемого и наблюдателя есть сходство между психологией и квантовой физикой, то возникает вопрос и о том, не окажется ли полезным для психологии математический аппарат, разработанный для описания квантовомеханических закономерностей⁹.

⁸ Фейнман Р. Характер физических законов. М., 1968, с. 138.

⁹ Гуревич И. И., Фейгенберг И. М. Какие вероятности «работают» в психологии? — В кн.: Вероятностное прогнозирование в деятельности человека. М., 1977, с. 9.

Искать ответ на этот вопрос нужно в эксперименте. Несколько экспериментов для выяснения сходства между психическими и квантовомеханическими явлениями были описаны К. Ву¹⁰. Поиски в этом направлении очень важны — они могут обогатить не только психологию, но и квантовую физику. Вместе с тем эти эксперименты сложны. И существенным в них является только положительный результат. Отрицательный результат не говорит об отсутствии аналогий между психологией и квантовой механикой: он говорит лишь о том, что реализующаяся в данном эксперименте ситуация является классической.

В следующем разделе мы даем описание эксперимента, который, может быть, дал бы ответ на вопрос о том, наблюдается ли в психологии нечто вроде интерференции в квантовой механике.

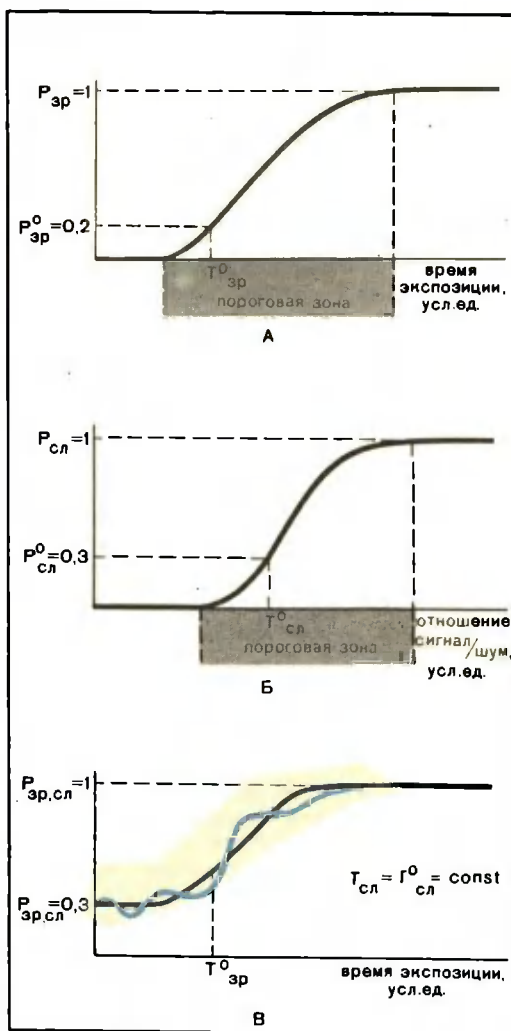
ПЕРСПЕКТИВЫ. ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА

Попробуем сконструировать психологический эксперимент, похожий в чем-то на опыт с двумя щелями в квантовой механике.

Какие-либо смыслы могут прийти до сознания субъекта через различные «входные ворота» — например, через зрение или через слух (увиденное слово или изображение, услышанное слово). Эксперимент состоит из трех частей.

А. В первой части эксперимента исследуют скорость распознавания зрительного сигнала. На экране перед испытуемым проецируется сетка (играющая роль «стирающего изображения»). После предупреждения («внимание!») сетка сменяется написанным словом (стол, стул, дом, конь, слон и т. п.) или простым изображением соответствующего предмета, вслед за чем на экране вновь возникает стирающая сетка.

Экспериментатор варьирует время экспозиции тестового изображения. Отмечается пороговая зона, т. е. зона таких экспозиций, короче которых испытуемый никогда не может опознать изображение, а длиннее которых всегда правильно опознает их. Пороговая зона — это зона изменений вероятности правильного опознавания от 0 до 1. В этой зоне находят экспозицию, при которой с вероятностью 0,2 человек правильно опознает изображе-



Вероятность правильного распознавания зрительного, слухового и смешанного сигналов в зависимости от времени экспозиции, отношения сигнал/шум и от времени экспозиции при фиксированном отношении сигнал/шум.

T_{zp}^0 — время экспозиции, при которой сигнал распознается с вероятностью $P_{zp}^0 = 0.2$; T_{sl}^0 — отношение сигнал/шум, при котором сигнал распознается с вероятностью $P_{sl}^0 = 0.3$.

В случае В отношение сигнал/шум остается постоянным, $T_{sl} = T_{sl}^0 = \text{const}$. (соответствует $P_{sl}^0 = 0.3$).

Монотонное возрастание $P_{zp,sl}$ (черная кривая) говорило бы в пользу «классической» закономерности, а немонотонное (возможный вариант которого дан красной кривой) — в пользу неклассической закономерности с наличием «интерференции».

¹⁰ Woo C. H. — Exp. Approach. Foundations Phys., 1981, v. 11, 8 11/12, p. 933.

ние. Назовем эту экспозицию $T_{зр}^0$, а вероятность опознания изображения при этой экспозиции $P_{зр}^0$.

Б. Во второй части эксперимента исследуется слух — распознавание речевых сигналов (слова «стол», «стул», «дом», «кони», «слон» и т. п.) на фоне шума. Шум и речевой сигнал подаются через наушники. Слова — это названия тех же предметов, изображения которых в первой части показывали на экране. Интенсивность шума остается постоянной, меняется интенсивность речевого сигнала. Отыскивается пороговая зона для соотношения сигнал/шум. В этой зоне находят такое соотношение сигнал/шум, при котором сигнал правильно опознается с вероятностью 0,3. Назовем это соотношение сигнал/шум $T_{сл}^0$, а вероятность правильного опознания изображения в этих условиях $P_{сл}^0$.

В. Теперь, когда установлены $T_{зр}^0$ и $T_{сл}^0$, перейдем к третьей, решающей части эксперимента. Будем исследовать одновременно зрение и слух. Испытуемого предупреждают, что в каждой пробе одновременно будут экспонировать на экране какое-либо изображение и называть этот предмет на фоне шума.

Какова должна быть вероятность правильного опознания, если будем одновременно экспонировать изображение с экспозиций $T_{зр}^0$ и называть этот предмет с соотношением сигнал/шум $T_{сл}^0$? Какого результата ждет здесь а priori «обыденный смысл»?

Некоторым кажется, что вероятность опознания при этом $P_{зр,сл}^0$ будет больше, чем $P_{зр}^0$ и чем $P_{сл}^0$: ведь здесь увеличено число признаков, по которым можно опознать изображение. Другим кажется, что в этих условиях вероятность опознания уменьшится — ведь внимание субъекта рассеивается между зрением и слухом. Создается странная ситуация, когда любой возможный результат опыта легко объясняется. Ни тот, ни другой результат не противоречит «обыденному смыслу». Значит, «обыденного смысла» недостаточно для объяснения результата. Но продолжим эксперимент.

Начнем медленно и плавно увеличивать экспозицию изображения на экране. Спрашивается, будет ли при этом $P_{зр,сл}$ тоже монотонно увеличиваться, или участки увеличения частот правильного опознания будут чередоваться с участками, где такого увеличения нет. Первое говорило бы в пользу «классической» картины, второе — в

пользу того, что в наблюдаемом феномене имеется «интерференция».

Не окажется ли (по аналогии с опытом с двумя щелями), что в случае неклассического результата сознание субъекта, правильно опознав понятие, не может уловить, через какие «входные ворота» вошел опознанный сигнал — **разглядел** или **расслышал** субъект символ, соответствующий опознанному понятию? Не окажется ли, что если потребовать от субъекта различия того, какой символ (зрительный или слуховой) он опознал, то неклассический результат сменится классическим — исчезнет интерференция?

И если в результате подобных этому или других экспериментов принцип дополнительности займет свое место в психологии, то можно будет считать, что физика вернула свой долг: ведь именно размышления о психических явлениях натолкнули Нильса Бора на идею дополнительности в квантовой физике.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Бор Н. АТОМНАЯ ФИЗИКА И ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ПОЗНАНИЕ. М.: ИЛ, 1961.

Фейнман Р. ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ. М.: Мир, 1968.

Гуревич И. И., Фейгенберг И. М. КАКИЕ ВЕРОЯТНОСТИ «РАБОТАЮТ» В ПСИХОЛОГИИ? — В кн.: Вероятностное прогнозирование в деятельности человека. М.: Наука, 1977.

ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ И МАТЕРИАЛИСТИЧЕСКАЯ ДИАЛЕКТИКА. М.: Наука, 1976.



Голубой баран на Памире!

Г. Н. Сапожников,

кандидат биологических наук
Отдел охраны и рационального
использования природных ресурсов
АН Таджикской ССР
Душанбе

Обнаружить в наше время крупное млекопитающее в географическом районе, где раньше животное никогда не встречали, — безусловно событие не рядовое. Сенсация на Памире связана с голубым бараном, или нахуром (*Pseudois nayaur*), который до сих пор не значился среди млекопитающих нашей страны.

Начиная с 1972 г. на Памире в боковом ущелье урочища Баландкиик (северо-восточнее ледника Федченко) и в месте впадения р. Мургаб в Сарезское озеро при авиаобследовании местной фауны зоологи не раз видели животное, и похожее на архара и отличающееся от него. Так бы это и осталось териологической загадкой, если бы в 1975 г. в самом восточном уголке Таджикистана геолог В. И. Дронов не наткнулся на останки — череп с несколькими позвонками. В мое распоряжение череп попал в 1983 г. от В. А. Стальмаковой — доцента биологического факультета Таджикского государственного университета. И каково же было мое удивление, когда я признал в этой ценной находке череп взрослого самца голубого барана.

Судя по годовым кольцам на роговых чехлах, баран прожил около 7,5 лет и погиб, очевидно, в августе — сентябре. Слабая стертость и небольшая деформация жевательной поверхности зубов свидетельствовали о том, что погибшее животное находилось в хорошем состоянии. По рассказу Дронова, череп лежал на дне ущелья



Череп голубого барана, найденного на Памире.

с довольно крутыми склонами. Вероятно, баран был убит и съеден снежным барсом или волками, а остатки трапезы — голова животного — скатились в ущелье. Памятуя, что в скалистой местности волкам довольно трудно «взять» умелого скалолаза — голубого барана, более вероятной кажется его встреча с барсом.

Голубые бараны — крупные животные: их масса составляет 25—80 кг, длина тела колеблется от 115 до 165 см, а высота в холке — от 75 до 90 см. Шерсть молодых баранов, особенно в первую зиму, имеет серо-голубой оттенок,

за что животные и получили название голубых. Взрослые нахуры голубовато-серо-коричневого цвета, низ туловища у них светлый, даже беловатый, а по передней части ног проходят четко выраженные черные полосы. Хвост покрыт шерстью, лишь основание его нижней стороны, где расположены слабо развитые кожные железы, голое. Рога темно-оливкового цвета совершенно гладкие с хорошо заметными годовыми кольцами. Самые длинные из измеренных зоологами рогов достигают 85 см.

Животные рода *Pseudois* не относятся к настоящим баранам, некоторые зоологи считают даже, что называть нахура голубым бараном неправильно, скорее местное название этого животного — куку-яман (в переводе — голубой козел), данное населением Центральной



Скалистый горный участок — местообитание голубого барана.

Азии, больше соответствует его внешнему облику. В действительности копытные рода *Pseudois* представляют переходное звено между настоящими баранами рода *Ovis* и козлами рода *Capra*, имея признаки, роднящие их с теми и другими. Так, загнутые назад и вверх рога нахура больше похожи на рога дагестанского тура (*Capra cylindricornis*), а не на спиралевидные рога баранов; более коротким концевым отделом конечностей, особенно стопы, голубой баран также напоминает козлов. С баранами же нахур сходен довольно длинными ушами, отсутствием бороды, а также подвеса и «гривы» на шее.

До настоящего времени считалось, что нахур обитает в высокогорных ландшафтах (от 3 до 5,5 тыс. м над ур. м.) Гималаев, Тибета и в прилегающих горных поднятиях. Обычно нахуры встречаются в скалистых горных участках, а гор, поросших лесами и кустарниками, избегают. Только зимой, в период экстремальных для них условий, нахуры спускаются к верхней границе леса.

Вид *P. payaur* представлен тремя подвидами. К одному из них — *P. p. schaeferi* — относят самых мелких животных. Впервые обнаружены они в 1937 г.

немецким зоологом Э. Шефером в окрестностях Паданга (система Гималаев), но определены как подвида только в 1963 г. Голубые бараны Шефера живут обычно небольшими стадами и этим резко отличаются от животных двух других подвидов, стада которых насчитывают несколько десятков и даже сотен голов, зимой же могут достигать тысячи. Гон проходит в октябре — ноябре, а в конце мая — начале июня самка приносит одного ягненка. Продолжительность жизни нахуров составляет в среднем около 15 лет.

Второй подвид — *P. p. szechuanensis* — обитает в отдаленной восточной части видового ареала, протянувшейся вдоль западного Китая; нахуры третьего подвида — *P. p. payaur* — встречаются в западном Тибете и являются самой крупной формой вида.

Чтобы дать точное зоологическое описание попавшего в мои руки черепа, я сделал необходимые промеры и уточнил состояние зубов.

Поскольку голубой баран имеет сходство и с дикими козлами и с дикими баранами, важно было сравнить полученные результаты с морфологическими данными черепов близких нахуру родичей, одинакового с ним возраста. Для этого я использовал морфологические параметры черепов сибирского горного козла (козерога, *Capra sibirica*), обитающего в Тянь-Шане, дикого барана уриала (*Ovis orientalis vignei*), животного, распространенного на низкогорном

хребте Пянджский (Каратау, юго-западный Таджикистан) и памирского архара (*Ovis ammon polli*).

Оказалось, что многие черепные кости голубого барана короче и уже таких же костей уриала, козерога и архара, только лицевая часть черепа нахура более вытянута, чем у уриала, но все же короче, чем у козерога и архара. Судя по состоянию зубов, голубой баран лучше архара приспособлен к жестким травянистым кормам высокогорий Памира: у 5—6-летних архаров обычно зубы бывают стерты больше, чем у найденного 7,5-летнего нахура.

Сравнение найденного на Памире черепа нахура с коллекционными экземплярами, находящимися в Зоологическом институте АН СССР, приводит к выводу, что памирский голубой баран относится к подвиду *P. p. payaur*.

Обнаруженный в памирских высокогорьях новый вид диких копытных обязательно должен быть включен в «Красную книгу СССР», ведь территория Памира — это, вероятно, край ареала нахуров, и численность их в этих местах, по-видимому, довольно низка. Чтобы уточнить экологические особенности обитания голубых баранов на Памире (кстати, экология вида в целом изучена далеко не полно) и современное состояние памирской популяции, необходимы дальнейшие целенаправленные исследования, которые, как мне кажется, не замедлят последовать.

Космические исследования

Запуски космических аппаратов в СССР (сентябрь — октябрь 1984 г.)

исследовательский центр «Природа» для обработки и использования.

Основная задача спутника «Космос-1602» — получение

детальствуют о том, что источники излучения представляют собой облака с различной степенью яркости.

По-видимому, обнаружено глобальное распределение атмосферных газов на Венере в области, лежащей ниже обширных высоких облаков, скрывающих поверхность планеты и ее нижнюю атмосферу от оптических наблюдений с Земли.

Наблюдения велись в ближней инфракрасной части спектра; наиболее характерные изображения получены на длине волны 2,41 мкм. Интенсивность свечения ярких участков ночной стороны планеты местами достигала 1 % от ее яркости на освещенной Солнцем стороне.

Температура поверхности Венеры (740 К) настолько высока, что ее инфракрасное излучение весьма интенсивно. Однако обилие двуокиси углерода в атмосфере и большое количество взвешенных в ней твердых и жидких частиц приводит к эффективному поглощению такого излучения. Поэтому излучение, обычно регистрируемое на Земле, имеет своим источником верхние облака, низкая температура которых (230 К) приводит к тому, что излучение идет на более длинных волнах, около 10 мкм. По этой причине обнаружение коротковолнового инфракрасного излучения явилось полной неожиданностью.

Nature, 1984, v. 307, p. 222 (Великобритания).

Космический аппарат	Дата запуска	Параметры начальной орбиты			
		перигей, км	апогей, км	наклонение, град	период обращения, мин
«Космос-1592»	4.IX	209	380	72,9	90
«Космос-1593»	4.IX	19 141	19 141	64,7	676
«Космос-1594»					
«Космос-1595»*					
«Космос-1596»	7.IX	613	39 342	62,8	709
«Космос-1597»	13.IX	219	272	82,3	89,1
«Космос-1598»	13.IX	987	1 029	83	105,2
«Космос-1599»	25.IX	179	275	67,2	88,7
«Космос-1600»	27.IX	215	404	70	90,4
«Космос-1601»	27.IX	477	521	65,8	94,5
«Космос-1602»	28.IX	648	680	82,5	97,8
«Космос-1603»	28.IX	852	877	71,2	102,2
«Космос-1604»	4.X	613	39 342	62,8	709
«Космос-1605»	11.X	969	1 031	82,9	104,9
«Космос-1606»	18.X	649	678	82,5	97,7
«Космос-1607»	31.X	256	280	65	89,6

* Три спутника «Космос-1593, -1594 и -1595» запущены одной ракетой-носителем.

В сентябре — октябре 1984 г. в Советском Союзе были запущены 16 спутников серии «Космос» с научной аппаратурой, предназначенной для продолжения исследований космического пространства.

Три спутника «Космос-1593, -1594 и -1595» предназначены для отработки элементов и аппаратуры космической навигационной системы, с помощью которой предполагается определять местонахождение самолетов гражданской авиации и судов морского и рыболовного флотов Советского Союза.

На спутнике «Космос-1597» установлена научная аппаратура для продолжения исследования природных ресурсов Земли в интересах различных отраслей народного хозяйства СССР и международного сотрудничества. Информация с этого спутника поступает в Государственный научно-

оперативной информации и продолжение отработки новых видов информационно-измерительной аппаратуры и методов дистанционных исследований Мирового океана и поверхности Земли в интересах науки и различных отраслей народного хозяйства.

Планетология

Тепловое излучение Венеры

Астрономы Д. Аллен (D. Allen) и Дж. Кроуфорд (J. Crawford), работая на Англо-австралийском телескопе (Новый Южный Уэльс, Австралия), обнаружили поток коротковолнового инфракрасного излучения, идущий от темной, ночной стороны Венеры. Полученные изображения планеты сви-

Астрономия

Необычное поведение сейфертовской галактики NGC 4151

Первоначально сейфертовские галактики по виду спектра делились на два класса — галактики первого (Sy 1) и второго (Sy 2) типа. В спектре Sy 1 разрозненные линии имеют очень большую ширину, соот-

ветствующую скоростям движения галактического газа порядка нескольких тысяч километров в секунду. В спектре Sy 2 запрещенные и разрешенные линии имеют одинаковую ширину и соответствуют скоростям порядка нескольких сотен километров в секунду. Запрещенные линии возникают во внешних зонах, далеко от источника ионизации, где электронная плотность мала, а разрешенные линии — в области высокой электронной плотности.

Дальнейшее накопление наблюдательного материала по сейфертовским галактикам показало, что существенная их часть имеет промежуточный вид спектра: для разрешенных линий характерны широкий и узкий компоненты. Поэтому объекты промежуточного типа, в зависимости от относительной интенсивности широкого и узкого компонентов, стали классифицировать в пределах Sy1,2—Sy 1,8. Согласно этой классификации, галактика NGC 4151 была в свое время отнесена к типу Sy 1,5.

Однако В. М. Лютый, В. Л. Окнянский и К. К. Чуваев (Крымская станция ГАИШ и Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР), проведя фотоэлектрические и спектральные наблюдения этой галактики, установили, что в течение малого промежутка времени она из типа Sy 1,5 перешла в тип Sy 2. Так, в апреле 1984 г. блеск ядра этой галактики достиг минимального значения за весь период фотоэлектрических наблюдений (они велись с 1967 г.). В мае 1984 г. показатели цвета ядра достигли значений, характерных для ядер галактик второго типа. Спектральные наблюдения также показали, что самое сильное ослабление блеска в апреле — мае сопровождается уменьшением отношения эквивалентных ширин широкого и узкого компонентов примерно в 2,5 раза; подобный результат также свидетельствует о том, что наблюдаемая галактика NGC 4151 относится ко второму типу. Таким образом, впервые наблюдался переход сейфертовской галактики из одного типа в другой, причем происходящий столь быстро.

Необычайно быстрое из-

менение основных характеристик галактики NGC 4151 ставит вопрос о том, чем оно вызвано. Авторы пока избегают подробного обсуждения физической природы обнаруженных явлений. Однако они отмечают, что столь быстрое изменение широкого компонента не может быть объяснено изменением структуры и кинематики газа в области излучения разрешенных линий. Возможно, изменяются условия ионизации газа центральным источником.

Для понимания природы обнаруженного явления необходимо привлечь наблюдательные данные, полученные в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра.

Письма в АЖ, 1984, т. 10, № 11, с. 803—808.

Астрономия

Толщина колец Сатурна

До последнего времени толщина колец Сатурна оценивалась примерно в 1 км. Недавно, закончив обработку данных, полученных с борта межпланетной космической станции «Вояджер-1», американские исследователи Дж. Тайлер и Х. Зебкер (G. Tyler, H. Zebker; Станфордский университет, Пало-Альто, штат Калифорния) пришли к иному выводу.

Они установили, что наиболее внутреннее из этой системы — кольцо А — в толщину не превышает 50 м, а самое внешнее из видимых колец — кольцо С — обладает толщиной не более 10 м.

Частицы, из которых состоят кольца, образованы главным образом льдом. Диаметр каждой из этих частиц, расположенных почти в одной плоскости, измеряется, очевидно, миллиметрами. Вариации в размерах частиц связаны, по всей видимости, с приливными силами.

Каждое из колец делится на сотни более мелких, причем в их окраске наблюдаются существенные различия, причина которых пока не ясна. Деления между соседними кольцами за-

висят от диаметра образующих их частиц.

Во всяком случае, можно считать доказанным, что зоны делений между кольцами вполне реальны, а не являются следствием некоего оптического эффекта, как полагали некоторые ученые.

Umschau, 1984, В. 84, № 14/15, S. 432 (ФРГ).

Астрономия

Комета Джакобини — Циннера приближается

Хорошо известная астрономам комета Джакобини — Циннера возвращается в относительно близкие к нам области космоса раз в 6,5 года. Однако точное ее местонахождение каждый раз может быть несколько иным, поскольку с приближением к Солнцу ядро кометы теряет большое количество газов.

Поэтому большой удачей является ее недавнее «раннее» обнаружение группой астрономов, работающих на Китт-Пикской национальной обсерватории в штате Аризона (США).

Это первый случай наблюдения кометы Джакобини — Циннера с 1979 г. Тот факт, что ее обнаружили столь заблаговременно и в точке, предсказанной астрономами (вернее, всего в 4 дуговых секундах от ожидаемой точки), поможет организовать запланированную на сентябрь 1985 г. «встречу» этого небесного тела с международным космическим аппаратом ICE (International Cometary Explorer — Международный зонд для кометных исследований).

Наземные наблюдения за полетом ICE будут осуществляться международной сетью телескопов «Галлей». Этот аппарат под первоначальным названием ISEE-3 был запущен еще в 1978 г. С тех пор он провел ряд наблюдений солнечного ветра между Землей и Солнцем, а затем (в декабре 1983 г.) был переведен на орбиту, которая должна осенью

1985 г. привести его в район сближения с кометой Джакобини — Циннера¹. Через ее хвост он должен пройти 11 сентября 1985 г. Приборы на борту аппарата произведут регистрацию заряженных частиц и полей на расстояниях 10—20 тыс. км от ядра кометы.

EOS (Transactions of the American Geophysical Union), 1984, v. 65, № 21, p. 362 (США).

Физика

Атомы в фотонной «бане»

Используя лазерные спектроскопические методы, Л. Холлберг и Дж. Холл (L. Høllberg, J. Holl; Национальное бюро стандартов, США) измерили сдвиг атомных уровней, вызванный воздействием излучения черного тела. Относительная величина сдвига очень мала — $2 \cdot 10^{-12}$. Столь малое смещение атомных уровней измерено впервые.

Изучение взаимодействия атомов с электромагнитными полями — издавна классическая задача атомной физики. Хорошо известны эффекты, возникающие при помещении атомов в статические поля. Не менее важны взаимодействия атомов с флуктуирующими переменными полями. Одним из самых знаменитых является, например, взаимодействие атомного электрона с вакуумными флуктуациями полей, приводящее, в частности, к так называемому лэмбовскому сдвигу атомных уровней. Благодаря лэмбовскому сдвигу расщепляются некоторые атомные уровни, энергии которых были бы равны в отсутствие флуктуаций электромагнитных полей в вакууме. Лэмбовский сдвиг был экспериментально обнаружен в 1947 г.

Примерно в то же время появились первые идеи о сдвиге атомных уровней из-за взаимодействия электронов не с виртуальными, а с реальными флук-

туирующими полями¹. Как известно, электромагнитное излучение, находящееся в нагретой полости, приходит в состояние термодинамического равновесия со стенками. При этом его свойства полностью определяются температурой T стенок и не зависят от их индивидуальных свойств. Такое излучение называется излучением черного тела. Флуктуирующее электромагнитное поле в полости можно представить как набор осцилляторов с различными собственными частотами колебаний. Электрон, помещенный в такую фотонную «баню», испытывает колебания под воздействием электромагнитных полей разных частот. Среднее значение кинетической энергии такого свободного электрона зависит от квадрата температуры излучения и фундаментальных констант — постоянной тонкой структуры α , постоянной Больцмана k , скорости света c и массы электрона m . В отсутствие полей кинетическая энергия покоящегося электрона равна нулю, так что излучение черного тела приводит к повышению энергии свободного электрона.

Этот же результат справедлив для высоковозбужденных атомных уровней, поскольку электрон в состоянии с большим значением главного квантового числа $n \gg 15$ находится далеко от ядра и может рассматриваться как почти свободный. Для низколежащих уровней влияние температурного излучения пренебрежимо мало.

Таким образом, все высоколежащие уровни повышают свою энергию на одну и ту же величину под влиянием излучения черного тела. Это приводит к изменению частоты излучения при переходах атомов с низко-

лежащих уровней на высоковозбужденные.

При комнатной температуре сдвиг составляет 2,4 кГц, т. е. он в 10^{12} раз меньше характерного энергетического масштаба атомной физики — энергии ионизации водорода (13,6 эВ, или $3,3 \cdot 10^{15}$ Гц в пересчете к единицам частоты). Лэмбовский сдвиг низколежащих водородных уровней составляет 10^5 Гц, т. е. почти в миллион раз больше. В свое время измерение лэмбовского сдвига стало вершиной экспериментального мастерства физиков. Теперь ясно, почему до сих пор не удавалось наблюдать температурный сдвиг атомных уровней.

В эксперименте атомы рубидия облучались лазером. Стимулировался переход из состояний с $n=5$ в состояния² с $n=36$. Для более точного измерения частоты перехода использовался метод двухфотонной спектроскопии: переход происходил при поглощении атомом двух фотонов из прямого и отраженного лазерного луча. Сумма энергий фотонов должна быть равна энергии перехода. В системе отсчета, связанной с атомом, фотоны имеют разные энергии (частоты) из-за эффекта Доплера. Однако для фотонов, движущихся в противоположных направлениях, доплеровское смещение равно по величине и противоположно по знаку. Метод двухфотонной спектроскопии позволяет, таким образом, избежать погрешностей, связанных с неконтролируемым движением

² Создание столь высоковозбужденных атомов удивительно само по себе. Размер атома водорода в основном состоянии порядка 10^{-8} см. Чтобы получить размер атома в возбужденном состоянии, надо эту величину умножить на квадрат главного квантового числа n . При $n=36$ атом водорода имел бы размеры порядка 10^{-5} см, что близко к длине волны видимого света. Это означает, что плотные объекты с чуть большими размерами доступны для наблюдения в обычных микроскопы.

¹ Подробнее об этом см.: Космический зонд уходит к комете. — Природа, 1984, № 6, с. 104.

¹ Впервые попытка теоретического рассмотрения эффекта была предпринята физиками из Университета в Дели (Индия); см.: Auluck F. C., Kothari D. S. — Proc. Roy. Soc. London, 1952, v. A214, p. 137. Наиболее подробные расчеты температурного сдвига выполнены в Аризонском университете (США); см.: Farley J. W., Wing W. H. — Phys. Rev., 1981, v. A23, p. 2397.

атомов. Соответственно возрастает точность измерений.

Вблизи области взаимодействия лазерных пучков с атомами помещался источник теплового излучения с заслонкой. Измерения проводились с открытой и закрытой заслонкой при разных температурах излучения: от 350 до 1000 К. Удалось зарегистрировать сдвиг в частоте лазерного излучения, при котором происходил переход с одного атомного уровня на другой. Измерение зависимости сдвига от температуры показало согласие с квадратичным законом, предсказываемым теорией.

Physical Review Letters, 1984, v. 53, p. 230 (США).

Физика

Запаздывающие тритоны испускаются ядрами лития

Группа французских исследователей (Институт ядерной физики в Орсе, Центр ядерной и масс-спектрометрии), сотрудничающая с международной группой «Изолюда» (ЦЕРН, Швейцария), сообщила о наблюдении запаздывающего испускания ядер трития (тритонов).

За последние пять лет открыто несколько новых типов радиоактивности атомных ядер, что в первую очередь связано с успехами в синтезе ядер с необычным соотношением числа протонов и нейтронов. Исследования одного из таких экзотических ядер — ${}^{11}\text{Li}$ (время жизни 8,5 мс), которое содержит большой избыток нейтронов, уже привели к открытию запаздывающего испускания двух и трех нейтронов¹, а также ядер ${}^6\text{He}$. Термин «запаздывающее» применяют к такому процессу испускания частиц ядром, когда они вылетают почти сразу вслед за

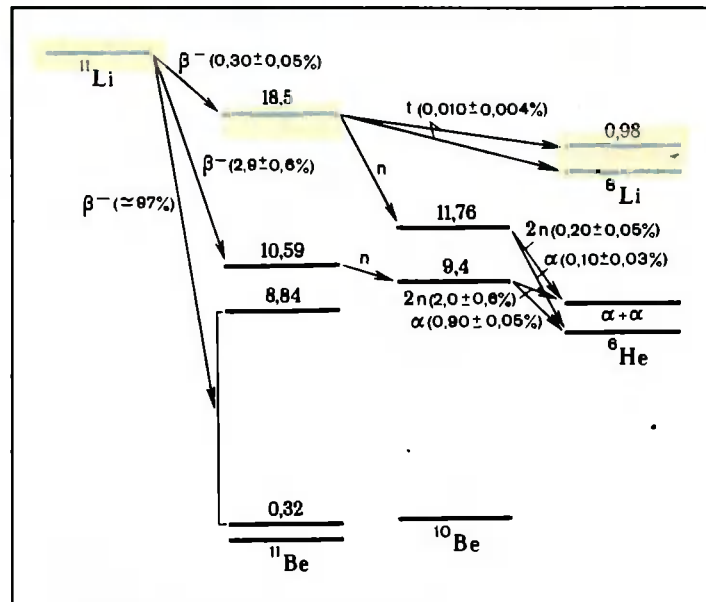


Схема распада нейтроноизбыточного ядра ${}^{11}\text{Li}$. Энергии возбужденных состояний ядер ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^6\text{Li}$ даны в МэВ. Буквы β , n , α , t обозначают распады с вылетом электрона, нейтрона, α -частицы и тритона, соответственно. Цифры в скобках указывают относительную вероятность данной моды распада.

электронами β -распада этого ядра. В случае, о котором идет речь в заметке, сначала происходил β -распад ядра ${}^{11}\text{Li}$, а затем уже вылетал тритон. Стоит отметить, что богатство ветвей распада ядра ${}^{11}\text{Li}$ обусловлено большой энергией его β -распада (20,7 МэВ), которая и делает все эти распады энергетически разрешенными.

Еще 15 лет назад теоретики исследовали возможность испускания ядрами тритонов и уже тогда очертили круг ядер, у которых такую моду распада стоит искать. Но к настоящему времени только два из них — ${}^{11}\text{Li}$ и ${}^6\text{He}$ — удалось получить в количествах, достаточных для детального изучения их свойств.

Схема эксперимента в основных чертах была такой же, как и при поиске двух- и трехнейтронной запаздывающей активности ${}^{11}\text{Li}$. Ядра ${}^{11}\text{Li}$ получались при бомбардировке урановой мишени пучком протонов с энергией 600 МэВ на синхротроне ЦЕРНа. От других продуктов реакции они отделялись на масс-сепараторе «Изолюда». Затем пучок ионизованных атомов ${}^{11}\text{Li}$, имевший интенсивность около 150 атомов $\cdot \text{с}^{-1}$, направлялся на коллектор, который представлял собой тонкую углеродную фольгу, расположенную перед детектором заряженных частиц. Этот детектор и регистрировал ядра трития.

За 11 часов работы установки на коллектор попало 6 млн ионов ${}^{11}\text{Li}$ и было зарегистрировано 12 распадов с вылетом тритона. Оказалось, что тритоны вылетают с разными энергиями. Это было интерпретировано как указание на то, что ядро — остаток ${}^6\text{Li}$ — иногда остается в возбужденном состоянии. Помимо обнаружения новой моды распада, в эксперименте была уточнена вся схема распадов ядра ${}^{11}\text{Li}$. Она приведена на рисунке.

¹ Гапонов Ю. В. Запаздывающая двухнейтронная активность ядер. — Природа, 1980, № 9, с. 110; Запаздывающая трехнейтронная активность ядер ${}^{11}\text{Li}$. — Природа, 1981, № 11, с. 107.

² Берлович Э. Е., Новиков Ю. Н. — Известия АН СССР, 1969, т. 33, с. 679.

Препринт Института ядерной физики в Орсе, IPNO/D RE-84-26, 1984 (Франция)

Химическая физика

Синтез в режиме горения

Развитие водородной энергетики диктует необходимость разработки методов аккумуляции и хранения водорода, причем в удобной обратимой форме. К таким методам относится получение водородсодержащих соединений, в частности гидридов металлов, нагрев которых высвобождает водород; например, в гидриде титана наибольшее объемное содержание водорода более высокое, чем в жидком водороде.

В последние годы обнаружено, что тугоплавкие бинарные соединения металлов IV группы (Ti, Zr и т. п.) взаимодействуют с водородом с образованием тройных соединений — карбогидридов и гидридонитридов. Такие соединения наиболее интересны как водородсодержащие материалы, поскольку способны удерживать водород при более высоких температурах, чем большинство известных бинарных гидридов. Чтобы получать тройные водородсодержащие соединения, ранее использовалась ступенчатая технология гидрирования порошков. Сотрудники института химической физики АН АрмССР (Ереван) предложили одностадийный способ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза карбогидридов и гидридонитридов титана из смесей соответствующих простых веществ (Ti, C, H₂, N₂). В основе метода лежит реакция экзотермического взаимодействия химических элементов, протекающая в режиме направленного горения без применения постоянно действующих нагревательных устройств. Взаимодействие инициируется мгновенным локальным источником энергии.

По одностадийной методике в системе Ti—H—N были получены тройные соединения Ti N_x H_x в смеси с бинарными — TiH₂ и TiN. При изменении параметров системы — давления газов, плотности и дисперсности исходной твердой фазы — удавалось повысить выход продукта и снизить выход бинарных соединений, однако пол-

ностью исключить выход бинарных соединений пока не удалось. Полученные образцы гидридонитридов титана имели гексагональную плотноупакованную структуру.

Доклады АН СССР, 1984, т. 276, № 1, с. 136—140.

Химическая технология

Карбал — сверхтвердый композиционный материал

Сотрудники Ленинградского технологического института им. Ленсовета сообщили о новом сверхтвердом композиционном материале, получившем в соответствии с его составом название карбал (карбонеум + алмаз). Способ получения карбала основан на связывании отдельных алмазных зерен углеродом, представляющим сочетание атомов углерода с различными гибридными орбиталями (sp³, sp², sp). Для синтеза таких переходных форм углерода используют смеси определенных углеродсодержащих веществ.

Поверхность карбала характеризуется высокой шероховатостью и большим числом режущих граней, хорошими физико-механическими и термическими свойствами; поэтому из карбала можно изготовить инструменты высокого качества. Испытания показали, что абразивные порошки из карбала способны выдерживать большие нагрузки в течение длительного времени. Образцы карбала обладают и высокой термостойкостью, выгодно отличаясь от металлоалмазных сверхтвердых композитов.

Интересно, что карбал имеет природные аналоги — поликристаллические плотные «углистые» алмазы типа карбонадо, содержащие алмазные зерна размером в десятки микрон, также связанные между собой одной из переходных форм углерода. Именно эта разновидность природных алмазов рекомендовала себя как особо

ценная для изготовления инструмента. Карбонадо имеет самый высокий для природных технических поликристаллических алмазов предел прочности на сжатие (40—80 кгс/мм²); у карбала этот показатель достигает 48 кгс/мм². Предполагается, что карбал заменит дефицитные природные алмазы.

Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 4, с. 887—889.

Иммунология

Вакцинация людей с различными группами крови

Известно, что живой организм постоянно подвергается воздействию множества мутагенных факторов, которые в определенном проценте случаев способны вызвать изменения в клеточном геноме. Контроль за генетическим постоянством клеток осуществляет иммунная система (так называемый иммунный надзор), которая и удаляет из организма клетки с измененным хромосомным набором. В пределах этого контроля наблюдается определенная изменчивость индивидуальной чувствительности к мутагенным факторам, зависящая от генетических особенностей организма. В качестве таких факторов могут выступать некоторые вирусы. Так, еще в 1972—1976 гг. у вирусов кори и гриппа была обнаружена способность вызывать цитогенетические нарушения в клетках человека.

Н. Н. Ильинских (Тюменский медицинский институт) изучал цитогенетические нарушения в клетках крови (лимфоцитах) здоровых доноров, которым ввели вакцину гриппа. Использовалась живая дивакцина против гриппа А2 и В. Обследованию подвергались 14 доноров с I (O) группой крови, 14 — со II (A) группой, 13 — с III (B) группой и 15 доноров с IV (AB) группой крови. Анализ хромосомного набора лимфоцитов их крови был проведен как до вакцинации (контроль), так и спустя 2, 7 и 30 дней после нее. Исследовалась также реакция blast-

трансформации¹ лимфоцитов как один из показателей состояния иммунной системы.

У всех доноров после проведения вакцинации наблюдалось повышение процента лимфоцитов, имевших цитогенетические нарушения (например, хромосомные aberrации, изменение числа хромосом и т. д.). При этом преимущественные нарушения в хромосомном наборе отмечались у лиц с I группой крови; у этой группы нарушения возникали уже спустя трое суток после вакцинации, тогда как у доноров с другими группами крови только через 7 дней. У лиц с I группой была снижена также степень выраженности реакции бласттрансформации.

Согласно имеющимся сведениям, люди с I группой крови наиболее часто подвержены заболеванию гриппом, что, возможно, связано со снижением иммунологической сопротивляемости их организма по отношению к гриппозному антигену. Не исключено, что в результате и возникают цитогенетические нарушения в клетках. Вряд ли следует опасаться, что введение вакцины против гриппа вызовет цитогенетические нарушения, ведь иммунологический надзор за генетическим состоянием клеток организма с такими нарушениями, без сомнения, успешно справляется. Что же касается создания достаточно прочного иммунитета против гриппа и других инфекционных заболеваний (например, чумы, возбудитель которой вызывает у лиц с I группой крови более слабый иммунологический ответ, чем у лиц с другими группами крови), то здесь очевидна необходимость учета групп крови для подбора соответствующих схем вакцинации. Известия АН СССР, серия биологическая, 1984, № 1, с. 31—39.

Генетика

Загадки пола

С генетической точки зрения мужчины и женщины различаются только по одной, двадцать третьей паре хромосом (половым хромосомам). В каждой клетке у женщины содержится две X-хромосомы, а у мужчины — одна X- и одна Y-хромосома. Признаки, обусловленные генами этих хромосом, называют сцепленными с полом. С Y-хромосомой сцеплены гены, которые определяют развитие мужских половых органов и желез и, соответственно, вторичных половых признаков. Удивительно поэтому, что в среднем один из 20 тыс. мужчин имеет вместо XY- две X-хромосомы.

Еще в 1966 г. М. А. Фергюсон-Смит (M. A. Ferguson-Smith) предложил следующее объяснение этого загадочного явления: во время мейоза (деления ядра при образовании половых клеток) у отца XX-мужчины происходит обмен участками между X- и Y-хромосомами. В результате X-хромосома получает тот генетический материал Y-хромосомы, который определяет развитие организма по мужскому типу. Это было косвенно подтверждено, когда обнаружили, что XX-мужчины не наследуют отцовский эритроцитарный антиген H^a , сцепленный с X-хромосомой. У некоторых XX-мужчин были выявлены различия по длине X-хромосом, свидетельствующие о возможности обмена участками разной длины между X- и Y-хромосомами. В 1983 г. К. Е. Бишоп (C. E. Bishop) с сотрудниками методом гибридизации выявили Y-специфические нуклеотидные последовательности в X-хромосомах трех обследованных XX-мужчин.

Казалось бы, гипотеза об обмене наследственным материалом между X- и Y-хромосомами получила основательное экспериментальное подтверждение. Но выяснилось, что далеко не все факты укладываются в рамки этой гипотезы. В одной из родословных были выявлены трое XX-мужчин, причем один из них получил обе X-хромосомы от матери! К тако-

му выводу исследователи пришли, исходя из следующего факта. У данного мужчины отсутствовали отцовские аллели H^a и H^m , находящиеся на противоположных концах X-хромосомы. Такая аномалия возможна в двух ситуациях: либо произошел обмен участками между отцовскими X- и Y-хромосомами сразу с двух противоположных концов, что очень мало вероятно, либо мужчина унаследовал обе X-хромосомы от матери.

В связи с этим было высказано предположение, что в X-хромосоме существуют гены-репрессоры, не позволяющие XX-организму развиваться по мужскому типу. В присутствии Y-хромосомы действие этого гена нейтрализуется. У XX-мужчины гены-репрессоры не работают в результате мутации или утраты гена.

Таким образом, причины феномена XX-мужчин на сегодня еще до конца не раскрыты. Наиболее перспективный путь дальнейшего изучения этого вопроса — исследование нуклеотидных последовательностей ДНК половых хромосом с помощью метода гибридизации. Nature, 1984, v. 307, № 5947, p. 109, 170—171 (Великобритания).

Биохимия

Дрожжевой белок, связывающий ионы кобальта

Для защиты окружающей среды от особо токсичных металлов изучаются возможности использования дрожжей и других микроорганизмов в качестве биологических сорбентов тяжелых металлов. Дело в том, что дрожжевые клетки содержат специфические белки, связывающие ионы меди и кадмия; кроме того, дрожжи способны накапливать значительные количества ионов кобальта.

А. П. Белов и Е. Г. Давидова (Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева) выделили из клеток дрожжей *Candida maltosa*, выращенных в среде, обогащенной ионами кобальта, белок с молекулярной массой

¹ Реакция бласттрансформации представляет собой переход лимфоцитов в малодифференцированные формы под воздействием специфических антигенов или неспецифических стимуляторов.

5000 Д. Этот белок связывал ионы кобальта: на 1 моль белка приходилось 4 грамм-атома ионов Co^{2+} . Для сравнения: известные кадмий- и медь-связывающие белки содержат 5, 4 и 8 грамм-атомов металла на 1 моль белка соответственно.

Для нового кобальт-связывающего белка характерно более высокое содержание аминокислоты цистеина.

По мнению авторов работы, этот белок выполняет функцию детоксикации внутриклеточных ионов кобальта.

Биохимия, 1984, т. 49, № 9, с. 1492—1495.

Биохимия

Создаются новые биоспецифические материалы

В лабораторных исследованиях, в медицине и биотехнологии в последнее время все чаще используют биоспецифические материалы. Это органические и неорганические сорбенты (их называют также носителями, матрицами), к которым присоединены ферменты, лекарственные вещества, микроорганизмы. Среди множества соединений, используемых в качестве сорбентов, до сих пор почти не применялись лишь углеродные материалы — графит, уголь. А ведь хорошо известно свойство углей очищать кровь от различных ядовитых веществ.

Считая, что разработка этого типа материалов необходима, группа исследователей Института общей и неорганической химии АН УССР (Киев) провела серию экспериментов по получению физиологически активных материалов на основе углеродного гемосорбента, уже используемого в клиниках при различного рода отравлениях. С помощью хорошо разработанных и уже получивших широкое применение методов к гемосорбенту были присоединены различные биомолекулы: человеческие тромбин, сывороточный альбумин, γ -глобулин, антименингококковые иммуноглобулины А и С, антитела против имму-

ноглобулина G, уреазы из растений и микробная нуклеаза.

Полученные на основе углеродной матрицы материалы обладали узкой специфичностью закрепленных на них биологически активных молекул. Так, тромбин около трех месяцев сохранял 50 % тромбообразующей активности; антитела к иммуноглобулину G абсолютно точно «отбирали» его из плазмы крови и самой крови; нуклеаза расщепляла нуклеиновые кислоты; уреазы разлагала мочевины; антименингококковые иммуноглобулины А и С удаляли менингококковые токсины серотипов А и С из модельных растворов. Кроме того, новые биоматериалы сохраняли до 50—60 % универсальной поглощательной способности исходного гемосорбента.

Таким образом, получены новые биоспецифические материалы, которые не только сохраняют общее свойство углей очищать кровь от различных ядов, но и проявляют узкую биологическую активность. Это первая ступень по созданию биосорбентов будущего, так необходимых для клинических исследований. Очень заманчива перспектива с помощью таких материалов регулировать тривиальные нарушения обмена и одновременно осуществлять энзим- и иммунокоррекцию, например лечить аутоиммунные заболевания.

Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 5, с. 1236.

Медицина

Причины образования метастазов

Способность давать метастазы представляет главную опасность каждой опухоли. При этом распространение клеток первичной опухоли имеет свои особенности: отрываясь от общей массы клеток растущей опухоли и блуждая по кровеносным и лимфатическим сосудам, отдельные опухолевые клетки останавливаются и дают начало новым опухолям. В то же время в процессе миграции эти клетки не опасны, так как, двигаясь по организму, они не

размножаются. Поэтому огромный интерес представляют исследования причин задержки мигрирующих клеток первичной опухоли.

В последние годы сделаны попытки разгадать это явление. Они основываются на гипотезе «ключа» и «замка», согласно которой на поверхности блуждающих злокачественных клеток имеются молекулы, способные распознавать другие молекулы на поверхности здоровых клеток, соединяться с ними и тем самым способствовать прикреплению к ним клеток опухоли. Группа Ф. Ширрмахера (V. Schirmacher; Гейдельберг, ФРГ) сравнила способность клеток двух опухолевых тканей лимфоидных органов мышей соединяться с другими клетками. Клетки первой опухоли, названные Eb, были гораздо менее злокачественны, чем клетки второй опухоли, Esb. Чтобы обнаружить присутствие на поверхности злокачественных клеток специфических молекул («ключ»), способных связываться с рецепторами на поверхности здоровых клеток («замка»), клетки обеих опухолей смешали с клетками печени мышей, на поверхности которых имеются молекулы галактозы. Оказалось, что более злокачественные клетки Esb активно соединялись с клетками печени, образуя своеобразные розетки (т. е. множество клеток Esb окружало каждую клетку печени, прилипая к ней). Клетки Eb с клетками печени таких розеток не образовывали.

Другая группа авторов из отделения радиобиологии Центра ядерных исследований (Бельгия) показала, что введение здоровым мышам клеток мышинной лейкемии с предварительно модифицированной структурой молекул сахаров, расположенных на их поверхности, приводило к изменению обычной картины задержки клеток в печени и селезенке.

Проведенные эксперименты показывают, какую важную роль в обнаружении метастазов могут играть сахара, расположенные на поверхности злокачественных и здоровых клеток.

Biology of the Cell, 1984, № 3, p. 51 (США).

Биотехника

Автоматический секвенатор ДНК

Определение первичной структуры, или секвенирование, ДНК — один из важнейших методов исследования в теоретической и прикладной молекулярной биологии. Он заключается в установлении линейной последовательности четырех нуклеотидов, составляющих ДНК; процедура эта очень однообразна, трудоемка и утомительна.

Судя по поступлению данных о первичной структуре ДНК в международный компьютерный банк данных, суммарная скорость секвенирования в мире уже сейчас может превышать 1 млн нуклеотидов в год. Но в недалеком будущем даже эта скорость может оказаться недостаточной. Например, для определения первичной структуры генома человека нужно просеквенировать около 3 млрд нуклеотидов.

Японской фирмой «Сэйко, инструменты и электроника» (Токио) совместно со специалистами физического факультета Токийского университета под руководством А. Вада (A. Wada) создан автоматический секвенатор ДНК. Он представляет собой микрохимический робот, способный манипулировать сразу с 16 растворами, и, таким образом, секвенировать сразу 4 фрагмента ДНК по 4 нуклеотида на каждый фрагмент. Полный цикл операций завершается за 4—5 ч. Выполняя последовательно 2 набора операций, автомат выдает через каждые 10 ч работы 32 раствора, готовых для последующего электрофоретического анализа. Хотя скорость работы автомата и расход реактивов такие же, как у человека, робот будет широко использоваться в современных лабораториях, поскольку он освобождает квалифицированных специалистов для более продуктивной работы. Выпуск автомата-секвенатора планировалось начать в конце 1984 г.

Nature, 1984, v. 307, № 5947, p. 193 (Великобритания).

Биология

Вирусы у Юрибейского мамонта

Исследования трупов мамонтов, несколько тысячелетий пролежавших в ледяных линзах вечной мерзлоты, интересны для различных областей биологической науки. Подобные работы проводятся обычно комплексно: морфологами, гистологами, биохимиками, микробиологами и другими специалистами. Последняя по времени находка мамонта на территории нашей страны (1979 г., Гыданский п-ов, берег р. Юрибей) впервые была исследована вирусологами.

М. И. Михайлов, С. В. Кузнецов и В. М. Жданов (Институт вирусологии им. Д. И. Иванова АМН СССР, Москва), изучая под электронным микроскопом содержимое кишечника Юрибейского мамонта 10—12-летнего возраста, обнаружили вирусоподобные частицы сферической и палочковидной формы. Диаметр сферических образований равен 50 нм, их сердцевины — 30 нм, а толщина поверхностной оболочки — около 10 нм. Палочковидные формы имели вид тонких гибких нитей разной длины, но с постоянным поперечником около 10 нм. Мелкие субъединицы, образующие каждую нить, чаще всего располагались по ее ходу в виде спирали. Судя по морфологическому сходству оболочек сферических и палочковидных частиц, они, по-видимому, подобны и в структурном отношении.

В препарате, полученном из исходного путем его очистки, вирусоподобные частицы сохранились, но мономеры нитей стали менее отчетливыми, а оболочка сферических форм — более рыхлой. Вероятно, эти изменения обусловлены набуханием белка, происшедшим в процессе обработки препарата.

Проведя специальные опыты, исследователи не обнаружили патогенной активности вирусоподобных частиц Юрибейского мамонта, пролежавшего в вечной мерзлоте около 10 тыс. лет.

Относятся ли эти частицы к вирусам самого мамонта или к вирусам окружающей его флоры и фауны, авторы работы предполагают выяснить в своих дальнейших исследованиях. Доклады АН СССР, 1984, т. 277, № 1, с. 223.

Психология

Сравнительная эффективность групповых и индивидуальных решений

Канадский психолог Ф. Майнер (F. Miner, Университет св. Марии в Галифаксе) обнаружил, что эффективность принятия решения в трудной ситуации группой выше средней эффективности принятия решения каждым из ее членов.

Ситуация, из которой требовалось найти выход, была связана с выживанием арктической экспедиции при аварии транспортного средства. В эксперименте приняли участие 69 групп по 4 человека в возрасте 22—29 лет. Успешность решений оценивали 4 эксперта (опытные полярники, преподаватели Военной полярной школы); их оценки совпадали в подавляющем большинстве случаев. Определялась средняя эффективность: индивидуальных решений, групповых, лучших (по мнению экспертов) индивидуальных решений в каждой группе и лучших (по мнению группы) индивидуальных решений.

В группах применялись две основные стратегии группового решения. По стратегии «индивид — группа» сначала решение принимал каждый член группы, а затем происходило общее обсуждение и выносилось решение. По стратегии «группа — индивид» сначала задачу обсуждали все вместе, затем каждый обдумывал свой вариант решения, и группа выбирала лучший. Во втором случае эффективность группового решения была равна средней индивидуальной эффективности и значительно ниже максимальной возможной индивидуальной эффективности (средней эффективности 69 лучших реше-

ний). Иной результат наблюдался при первой стратегии: групповые решения были значительно эффективнее средних индивидуальных и приближались к оптимальным.

Интересно, что индивидуальные решения, которые члены группы выдвигают в качестве лучших, значительно уступают в качестве групповым решениям. Статистика показала, что выбор членами группы «лучшего» среди своих индивидуальных решений — процесс случайный, т. е. группа неспособна выбрать действительно лучшее индивидуальное решение. За счет чего решение группы оказывается значительно лучше (при стратегии «индивид — группа») среднего решения индивидов, остается неясным. Ясно только, что группа может найти лучшее решение, чем индивид, и что это происходит не за счет умения группы выбирать лучшее индивидуальное решение, а благодаря каким-то иным процессам коллективного мышления.

Organizational Behavior and Human Performance, 1984, v. 33, № 1, p. 112—124 (США).

Психология

Восприятие детьми необычных явлений

Считается, что в психике ребенка поначалу господствует «анимистический» подход к объяснению окружающего мира, в рамках которого возможны сверхъестественные явления и который позже сменяется «естественнопричинным» подходом.

Исследуя этот вопрос, Е. В. Субботский (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова) предлагал детям 4—7 лет «волшебные» игрушки: шкатулку, в которой должны оживать положенные в нее картинки; стол, на котором игрушечные звери должны превращаться в настоящих; автомобиль, который должен двигаться при перемещении картинки по столу. Предварительно экспериментатор выяснял,

что подавляющее большинство детей (после 5 лет — 100 %) четко различают ситуацию сказки, где такое волшебство возможно, и реальные условия, в которых господствуют естественные причинные связи; веря в сказку, ребенок тем не менее категорически отрицает возможность чудес в конкретной ситуации эксперимента. Однако, оставшись наедине с «волшебным» объектом, те же дети демонстрировали активное «магическое поведение»: произносили рекомендованные заклинания, использовали магические пассы и т. п. Многочисленные детали такого поведения указывают, что оно было не обычной игрой, а проявлением действительной веры во сверхъестественное в реальной жизни. Особенно ярко «магическое поведение» проявлялось при малейшем успехе (что достигалось с помощью несложных технических устройств: например, подвижный магнит в «волшебном» столе позволял игрушечному льву «спонтанно» передвигаться по столу).

Автор считает, что «анимистический» и «натуралистический» подходы представляют собой не последовательные стадии, а, скорее, два сосуществующих слоя психической жизни, причем в зависимости от конкретных социальных условий (поощрение и т. п.) может быть активизирован либо один, либо другой слой. Интересно, что в интервью после эксперимента дети, как правило, не пытались найти естественные причины наблюдаемых явлений (даже неудачи они объясняли тем, например, что магические слова произносились недостаточно четко). Вместе с тем они стремились ограничить мистический опыт в пространстве и во времени («волшебство сейчас было, но вообще-то оно невозможно»). Таким путем они достигали своеобразного «синтеза» естественного и мистического объяснений.

Хотя соотношение этих подходов меняется с возрастом, автор предполагает, что оба подхода могут иметь место и у взрослого человека.

Вестник Московского университета. Серия психологии, 1984, № 1, с. 17—31.

Зоология

Конкурентные отношения у паразитирующих личинок

У многих насекомых, паразитирующих на других насекомых (т. е. у паразитов-энтомофагов), в одной особи насекомого-хозяина из-за ограниченности пищевых ресурсов может развиваться только одна личинка. А что произойдет, если в одного хозяина будет отложено сразу несколько яиц паразита? В таких изредка встречающихся случаях множественного заражения возникает острая конкуренция между личинками. Интересно, что в итоге все равно одна личинка выживает, но остальные погибают рано, еще до того, как израсходован запас пищи.

Обычно у эктопаразитов (присасывающихся к телу хозяина снаружи) выживает самая молодая личинка, т. е. вылупившаяся последней из отложенных на хозяина яиц. Объясняется это тем, что вылупившаяся личинка короткое время — пока не присосется — подвижна и, ползая по телу хозяина, уничтожает конкурентов, присосавшихся раньше и уже неподвижных¹. У эндопаразитов живущих в теле хозяина, наоборот, обычно выживает старшая личинка: они всегда подвижны и потому старшая личинка способна уничтожать более молодых и слабых конкурентов.

Известен, однако, среди эндопаразитов уникальный случай, когда ситуация оказывается обратной. Речь идет о некоторых наездниках-энциртидах, которые откладывают в хозяина одно яйцо, из которого сразу развивается много генетически идентичных личинок. У этих одояйцовых близнецов возникло своего рода социальное поведение — разделение особой по выполняемым ими жизненным функциям. Сперва выводятся личинки-солдаты с мощными

¹ Price P. W. — Canad. Entomologist, 1972, v. 104, № 294, p. 129.

челюстями, которые освобождают хозяина от других личинок — возможных конкурентов для их братьев и сестер, а затем погибают, не развиваясь до взрослого насекомого и не оставляя собственного потомства².

В действительности до личиночной конкуренции у энтопаразитов доходит редко, так как у многих видов самка после заражения оставляет на хозяине видоспецифическую феромонную метку, которая отпугивает других самок этого же вида. Но разные виды по чужим меткам ориентироваться неспособны (пока такие случаи неизвестны), и потому межвидовые перезаражения обычны.

Недавно изучены особенности личиночной конкуренции у паразитов энтомофагов *Asobara tabida* и *Leptopilina heterotoma* (или, иначе, *Pseudeucoila bochei*). Обнаружено, что при одновременном заражении хозяина (мухи дрозофилы) в равной мере вероятно выживание каждого из этих паразитических видов³. Обычно одна личинка гибнет на ранней стадии в результате непосредственного физического столкновения с другой личинкой, но в некоторых случаях, видимо, действует иная, физиологический механизм, приводящий к гибели одного из конкурентов еще на стадии яйца. Однако самым неожиданным явилось открытие у личинок этих паразитов своего рода «взаимопомощи». У названных видов высока естественная смертность, связанная с защитной реакцией организма хозяина — инкапсуляцией яйца или личинки паразита. И вот оказалось, что при наличии двух личинок в одной особи хозяина инкапсуляция происходит гораздо реже. В итоге вероятность выжить в присутствии конкурента не ниже, чем в свободном от него хозяине.

В. М. Карцев
Москва

Биогеография

Размеры ареала и локальное обилие птиц

Исследование распределения птиц и их обилия исключительно важно для биогеографии и экологии, тем не менее взаимосвязь между этими факторами изучена слабо. Американские биологи К. Бок (С. Bock; Колорадский университет) и Р. Риклефс (R. Ricklefs; Пенсильванский университет) предприняли попытку проверить следующие гипотезы: виды с большими ареалами достигают большего среднего локального обилия, чем виды с меньшими ареалами; в пределах данного района широко распространенные виды являются также и более обильными в своих местобитаниях. Подобные исследования проводились и ранее, но географический масштаб большинства из них был ограничен. Американские исследователи впервые использовали обширные материалы так называемых рождественских учетов птиц Одобоновского общества. Для анализа были выбраны 65 видов зерноядных птиц из подсемейства овсянковых (Emberizinae) и щеглиных (Carduelinae), зимовочные ареалы которых в исследуемых районах — в США и южной Канаде — достаточны для статистически достоверных выводов.

Результаты обработки 7189 рождественских учетов, проведенных в 1962—1971 гг., полностью подтвердили первую гипотезу о связи размера ареала со средним локальным обилием. По данным учетов за 1979—1981 гг. исследователи установили верность и второй гипотезы: широко распространенные виды отличаются и существенно большим, по сравнению с локально распространенными формами, максимальным обилием.

В североамериканском сообществе зимующих птиц доминируют широко распространенные виды, имеющие большие общие размеры популяций, значительные максимальные и средние локальные размеры. Оказалось, что локально распрост-

раненные виды отличаются от широко распространенных ограниченными гнездовыми ареалами, что в большинстве случаев связано с недостатком подходящих биотопов и низкой общей численностью. Проведенные исследования наводят на мысль, что положительная корреляция между географическим ареалом и локальным обилием — неотъемлемое свойство большинства видов.

Причины исчезновения редких, в большинстве своем узкоареальных видов до конца не исследованы. Можно предполагать, что малый размер популяции, биотопическая специализация и снижение генетической изменчивости редких видов определяют их уязвимость и ведут к локальному, а возможно, и общему вымиранию.

The American Naturalist, 1983, v. 122, № 2, p. 295—299 (США).



Охрана природы

Дунайский лес в опасности

По обоим берегам Дуная ниже Вены на 30 км протянулся полосой в 3—5 км знаменитый Хайнбургский лес. Это уникальная для Западной Европы система первичного леса, некогда окаймлявшего русла всех здешних крупных рек, а ныне сохранившегося лишь в этой небольшой области Австрии. Особенности Хайнбургского леса состоит в том, что каждую весну, с таянием снегов в предгорьях Альп, вся его площадь (8 тыс. га) затопляется водами Дуная, местами на глубину 2—3 м. Экосистема этого района за многие века полностью приспособилась к такой сезонности. Из 43 видов рыб Дуная, например, многие заплывают в лес в период его затопления. Здесь обитают орланы, аисты, колпицы, древесные лягушки, черепахи, выдры, а из растений — водяные лилии, кувшинки, различные орхидеи. В лесу встречается 2/3 всех видов деревьев, произрастающих в Западной Европе. Из

² Cruz I. P. — Nature, 1981, v. 294, № 5840, p. 446.

³ Van Strien-van Liemp W. T. F. H. — Neth. J. Zool., 1983, v. 33, № 2, p. 125.

200 видов гнездящихся и перелетных птиц 15 объявлены находящимися под угрозой исчезновения.

Призывы эколога Г. Вендельбергера (Wendelberger; Венский университет) провозгласить Хайнбургский лес первым в Австрии национальным парком был активно поддержан общественностью страны. Однако этому противоречит выдвинутый недавно промышленными кругами план строительства гидроэлектростанции, предусматривающий сооружение плотины на Дунае ниже Хайнбурга и отведение дунайских вод в специально прорываемый канал, который, прорезав значительную часть Хайнбургского леса, уничтожит 800 га его территории. Кроме того, высокие дамбы, которые предполагается создать по берегам Дуная, будут препятствовать ежегодному разливу реки, от которых полностью зависит здешняя экологическая система.

В Австрии развернулась широкая кампания за сохранение Хайнбургского леса, в которую включились 20 различных общественных организаций, в том числе ассоциация «Друзья Земли», Зоологическое и Ботаническое общества Австрии. Среди участников кампании — известный биолог, лауреат Нобелевской премии К. Лоренц. С поддержкой Всемирного фонда охраны дикой природы это движение приобрело международный характер.

New Scientist, 1984, v. 102, № 1409, p. 7 (Великобритания)

Палеонтология

Крупнейший среди ихтиозавров

Рабочие Бельмонтской каменоломни под Лионом (Франция) в мае 1984 г. обнаружили окаменелые остатки неизвестного животного. Группа палеонтологов из Лионского университета, возглавляемая Ж. Иголеном (J. Igolen), в течение недели, на которую цементная компания

прервала работы, провела здесь раскопки. Удалось найти довольно полные детали скелета нового для науки вида ихтиозавра, жившего в эпоху мезозоя, около 180 млн лет назад.

Судя по остаткам (общее их число около 300), тело животного достигало в длину 11 м. Специалисты указывают, что среди известных примерно 50 сравнительно полных скелетов ихтиозавров лишь единицы едва достигают в длину 10 м, большинство же не превышает 1—3 м. Этот крупнейший ихтиозавр обладал четырьмя лапами, вытянутой мордой и длинным хвостом. По-видимому, детеныши появлялись из яиц, которые самка вынашивала в своем теле.

Бельмонтский ихтиозавр был найден на глубине 40 м, в слое глинистых пород, содержащем также большое число ископаемых остатков древних рыб, головоногих моллюсков — аммонитов и белемнитов. На некоторых видны следы зубов животного.

Изучение находки продолжается.

New Scientist, 1984, v. 102, № 1410, p. 20 (Великобритания).

Палеонтология

От кого произошли страусы!

Среди орнитологов и специалистов по эволюции многие десятилетия не угасает спор о том, действительно ли крупные бегающие бескилевые птицы (Ratitae) — страус, эму и др. — представляют собой древнюю отдельную группу птиц, или они продукт эволюции летающих птиц (Carnatae), у которых на грудной кости имеется развитый киль с прикрепленными к нему летательными мышцами.

В 1956 г. английский ученый Г. де Бир (G. de Beer) выдвинул гипотезу, что бескилевые произошли от летающих путем неотении (задержанного развития) и их так называемые «примитивные» черты (например,

мягкие и рассученные перья страуса) являются следствием неотении и вовсе не свидетельствуют в пользу древности бескилевых. Ныне с дальнейшей разработкой противоположной гипотезы выступил палеонтолог С. Макгоуэн (C. McGowan; Королевский музей в Торонто, Канада). В качестве аргумента, подтверждающего, что предки бескилевых были древнее летающих, он приводит ход эмбрионального развития задней конечности птиц.

Известно, что у птиц берцовые кости срослись с частью пяточных костей в единую длинную «голенопятку», а другая часть пяточных костей срослась в единую плюсну. Сустав, соединяющий эти сложные слитые кости, формирует птичью пятку. Область пятки и является, по мнению Макгоуэна, ключом к решению проблемы происхождения бегающих птиц.

Исследователь сравнил развитие зародышей у большого числа различных видов килевых и бескилевых птиц. При этом он нашел, что у килевых на ранних стадиях развития хрящевая шпора предголенной кости сливается с пяточной костью. У цыплят, например, этот процесс происходит в течение 40 дней после вылупления. У страусов же такой процесс носит совершенно иной характер. У них тоже имеется похожий на шпору восходящий отросток, который, однако, срастается с астрагалом — другой костью пяточного отдела. Только что вылупившийся страусенок обладает сильно выступающим и значительно окостеневшим отростком, который возвышается над пяткой, впереди от нижнего конца большой берцовой кости. Еще Т. Гексли более 110 лет назад установил, что восходящий отросток составляет часть астрагала у теропод, хищных двуногих динозавров. Все это и привело Макгоуэна к выводу, что страусы и другие бескилевые нелетающие птицы произошли от предков более примитивных, чем килевые летающие, но это не исключает возможности прохождения ими и стадии «летания».

Nature, 1984, v. 307, № 5953, p. 733—735 (Великобритания).

Геотектоника

Исследуется тройственная точка в Индийском океане

Группа французских исследователей из Института физики Земли при Университете им. Пастера (Страсбург, Франция) в феврале 1984 г. на судне «Жан Шарко» вела исследования так называемой тройственной точки — области схождения трех срединно-океанических хребтов: Западно-Индийского, Аравийско-Индийского и Центрально-Индийского. На полигоне размером 80×90 км выполнялись батиметрические и геофизические работы. Благодаря использованию узколучевых эхолотов, позволяющих картировать полосу дна шириной в несколько сот метров, удалось составить детальную структурную карту этого района.

Как оказалось, скорость спрединга дна составляет здесь 1,0; 6,0 и 3,6 см в год — соответственно для Западно-Индийского, Центрально-Индийского и Аравийско-Индийского хребтов. Два первых хребта подходят друг к другу почти под прямым углом; в месте их схождения изобаты дна резко разворачиваются всего на расстоянии нескольких сот метров, меняя простирание с северо-западного на юго-западное.

Морфология срединной зоны Центрально-Индийского хребта практически не изменяется при подходе к тройственной точке: на всем протяжении дна хребта характерна хорошо выраженная глубокая рифтовая долина. Похожа и морфология Аравийско-Индийского хребта. В отличие от этого, рифт Западно-Индийского хребта у тройственной точки имеет форму узкого глубокого каньона, который на расстоянии 15 км от нее начинает расширяться и переходит в сравнительно широкую и глубокую рифтовую долину; в 20 км от тройственной точки долина смещена по трансформному разлому.

Проведенные драгировки показали, что стенки каньона сложены серпентинитовой брекчией, а также базальтами (спилитами). Район самой трой-



Область схождения (тройственная точка) срединно-океанических хребтов в Индийском океане. Прямоугольником отмечен район работ научно-исследовательского судна «Жан Шарко».

венной точки выделяется незначительным поднятием дна.

Детальные исследования областей тройственных схождения литосферных плит, являющихся своеобразными узловыми зонами на поверхности нашей планеты, помогают в решении широкого круга вопросов планетарной геологии, геохимии и геофизики.

EOS (Transactions of the American Geophysical Union), 1984, v. 65, No 28, p. 439 (США).

Геофизика

Солнце, Луна и землетрясения

Неоднократно предпринимавшиеся ранее попытки найти связь между взаимным положением Луны, Земли и Солнца, с одной стороны, и сейсмическими явлениями — с другой, оказывались недостаточно убедительными. Существенный шаг сделан в этом направлении группой американских математиков-геофизиков во главе с С. Килстоном (S. Kilston; лаборатория компании «Хьюз Эйркрафт») и Л. Ноповым (L. Knopoff; Университет штата Калифорния, Лос-Анджелес).

Исключив из рассмотренных слабые землетрясения и афтершоки (которые, скорее, коррелируются с сильными землетрясениями, чем с внешними удаленными факторами), они проанализировали крупные сейсмические события, происходившие в период с 1933 по 1980 г. в южной части Калифорнии, между 33° и 36° ш. Для большей представительности в круг изучавшихся событий были введены 4 сильных (магнитуда более 6) землетрясения, происшедших там до 1933 г., но надежно зарегистрированных имевшейся в то время аппаратурой.

На данной территории ориентация главных разломов земной коры такова, что приливное напряжение в ней, имеющее широтное направление, служит фактором, который усиливает общее напряжение, вызывающее землетрясения (в районах, где разломы ориентированы в разных направлениях, анализ был бы затруднен, поскольку влияние солнечных и лунных приливов в твердом теле Земли могло бы приводить к самым разнообразным последствиям).

Установлено, что землетрясения магнитудой менее 6 не обнаруживают тенденции группироваться ни по времени суток, ни относительно фаз Луны (Солнце в связи с большим расстоянием оказывает еще меньшее воздействие на сейсмическую активность). Что же касается более сильных подземных толчков, то здесь отмечены следующие закономерности: они чаще происходят около 6 и 18 часов; в периоды, близкие к полнолунию и новолунию; каждые 18,6 года, когда Луна занимает самое северное положение на небосводе. С последним фактом связано время солнечных затмений, когда Солнце, Луна и Земля «выстраиваются» в прямую линию. Таким образом, ясно, что по крайней мере в Калифорнии существует связь между временем солнечных затмений и вероятностью мощного землетрясения. Как ни странно, корреляции со временем восхода и захода Луны, несмотря на относительно большее, чем у Солнца, ее воздействие на земные приливы, у сей-

смической активности не обнаружено.

В самом начале изучавшегося периода, 12 января 1933 г., Луна как раз находилась в крайней северной точке небосвода. Такое положение в дальнейшем приходится на 1950, 1969 и на конец 1987 г. Авторы высказывают предположение, что высокая вероятность сильного землетрясения в Калифорнии приходится на одно из полнолуний или новолуний вблизи восхода или захода Солнца примерно в ноябре 1987 г. Однако свой прогноз они сопровождают оговорками, указывая, что пока он являет собой лишь «попытку создания эвристической модели, подкрепленной довольно ограниченным массивом данных».

Nature, 1983, v. 304, № 5921, p. 21 (Великобритания).

Геология

Новые геологические карты

Вышли в свет последние 9 листов «Геологического атласа мира», публикация которого осуществлена ЮНЕСКО совместно с Международной комиссией по геологической карте мира. Весь Атлас состоит из 22 листов карт, масштабы которых для континентальных областей составляют 1:10 000 000, а для дна океанов 1:36 000 000. Каждый лист или тематически связанная группа листов сопровождаются объяснительной запиской на английском и французском языках. Атлас впервые отражает полную картину геологической изученности всей Земли, отвечающую современному состоянию знаний в этой области науки и практическим требованиям дня.

Начали выходить карты, публикуемые в соответствии с международным Проектом картирования дна Тихого океана, осуществляемым Международным союзом геологических наук. Комплект будет состоять из 5 многоцветных карт масштаба 1:10 000 000.

Распространением «Геологического атласа мира» занимается ЮНЕСКО, а «Геологи-

ческой карты Тихого океана» — Американская ассоциация геологов-нефтяников.

Episodes, 1984, v. 7, № 2, p. 34 (Канада).

Океанология

Глубоководные залежи полиметаллических руд

В рифтовых зонах подводных хребтов Хуан-де-Фука, Горда и Эндевор летом 1984 г. было осуществлено, как сообщает А. Малахов (А. Malahoff; Национальное управление океана и атмосферы, США), 16 погружений обитаемого глубоководного аппарата «Алвин». Глубина погружений достигала 3200 м; их цель — исследовать процессы образования подводных залежей полиметаллических сульфидных руд, обычно приуроченных к рифтовым зонам быстро расширяющихся срединно-океанических хребтов. Эти исследования у западного побережья США были начаты в 1982 г., работы 1984 г. — их вторая фаза. В новой экспедиции предстояло получить количественные характеристики геологических, химических и физико-океанографических процессов, протекающих в зоне излияния высокоминерализованных гидротерм, служащих источником рудного вещества¹.

Не обнаружив горячих источников на хребте Горда, участники экспедиции перенесли работы на хребет Хуан-де-Фука, где выходы гидротерм отмечались ранее². Измерения показали, что температура раствора, излияющегося в холодную придонную воду, составляет 293 °С. Севернее, в пределах хребта Эндевор, также были обнаружены гидротермальные источники, вокруг которых, как и на хребте Хуан-де-Фука, накопились суль-



Район работ глубоководных экспедиций (I — хребет Горда, II — хребет Хуан-де-Фука, III — хребет Эндевор).

фидные отложения значительной мощности. Конусообразные постройки, образовавшиеся вокруг устьев гидротермальных источников за счет отложения рудного вещества (так называемые «черные курильщики»³), достигают в высоту 12—15 м. По данным автора, они обогащены цинком настолько, что добыча их экономически целесообразна. В исследованном районе обнаружены также мощные марганцевые корки.

Одновременно с американской экспедицией на «Алвин» севернее работала канадская экспедиция, использовавшая обитаемый подводный аппарат «Пайсис-4». Исследования велись в пределах хребта Эксплорер; руководила экспедицией В. Танниклиф (V. Tanniciffe; Университет г. Виктория, Канада). Было выполнено 11 погружений на глубину до 1800 м. Измеренная температура гидротерм составила около 306 °С. Здесь также открыты залежи сульфидных полиметаллических руд.

И американские, и канадские исследования проводились в пределах 200-мильной зоны обеих стран или же в непосредственной близости от нее, что удобно для возможной постановки разведочных, а в даль-

¹ См. также: Базилевская Е. С. Гидротермы на океаническом дне. — Природа, 1984, № 2, с. 118.

² Глубоководные исследования рифтовых зон. — Природа, 1984, № 4, с. 117.

³ Подробнее см.: «Черные курильщики» на дне Марианского трога. — Природа, 1983, № 6, с. 117; «Черные курильщики» на Кипре. — Природа, 1984, № 9, с. 113.

нейшем — и горнодобывающих работ вблизи западного побережья Северной Америки.

Ocean Science News, 1984, v. 26, № 31, p. 4—5 (США).

Гидрография

Высокоточное определение океанских глубин

В феврале 1984 г. новое гидрографическое судно Японии «Такуйо», работая в Марианском желобе (западная часть Тихого океана), произвело детальную высокоточную съемку впадины Челленджер. Для промера глубин применялся многоканальный узкополосный эхолот; промер велся галсами на протяжении около 500 миль и охватил 140 км² площади океанского дна. При расчетах глубин вводилась поправка, учитывающая изменения скорости звука в воде за счет колебаний температуры и солености, регистрировавшихся автоматической аппаратурой. Для определения координат глубин использовалась специальная система (Hybrid Positioning System), которая работает следующим образом: координаты получают по системе спутниковой навигации и по радионавига-

Батиметрическая карта впадины Челленджер. I — 10 924 м, II — 10 909 м, III — 10 901 м — наибольшие понижения (точность определения ± 10 м).

ционной системе, а затем их по истинному времени вводят в ЭВМ, чем достигается максимально возможная точность определения географических координат.

На основе полученных данных составлена подробная батиметрическая карта впадины. По карте легко установить, что впадина имеет овальную форму с тремя понижениями более 10 800 м. Максимальное из них лежит в наиболее удаленной к востоку части впадины.

International Hydrographic Bulletin, 1984, № IX, p. 351—352 (Моннако).

Метеорология

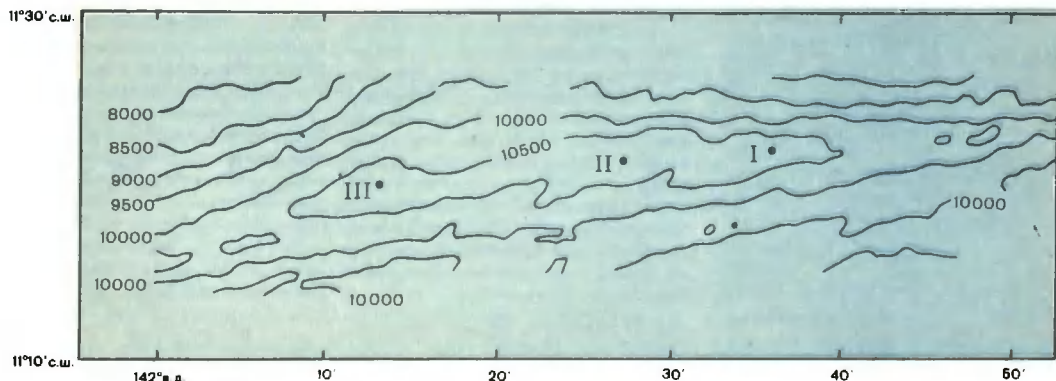
Метеоисследования в Арктике

Объединенная группа ученых США, Великобритании и Норвегии проводит широкие метеорологические исследования на Крайнем Севере Европы, в районе полярного круга; здесь обычно формируется область низкого давления, ответственная за экстремальные погодные условия в Европе.

В январе 1984 г. из аэропорта Кефлавик (Исландия) совершали полеты два самолета-лаборатории, на которых специалисты из НОАА (Национального управления по изучению океана и атмосферы США), НАСА и ВМФ США исследовали процессы взаимодействия

океана и атмосферы в районе, расположенном к востоку от Гренландии (место зарождения исландской области низкого давления). В феврале район исследований был перемещен в Будё (Норвегия), где американские, английские и норвежские специалисты впервые детально изучали такое характерное для арктической метеорологии явление, как полярные штормовые системы (системы низкого давления); это аналоги тропических ураганов, занимающие, однако, меньшую область. До сих пор оставалось неизвестным, возникают ли они в результате теплового обмена (конвекции) между океаном и атмосферой или вследствие волны, проходящей в средней части тропосферы; неясно также, обладают они теплым или холодным ядром.

Методика исследований состоит в том, что один из самолетов-лабораторий углубляется в поток холодного воздуха, где, по прогнозу, может образоваться полярная область низкого давления. Другой самолет вначале летит вне потока и принимает фотоинформацию с метеоспутника, позволяющую ему заметить первые признаки формирования области низкого давления. При их появлении самолет следует в данный район и движется вместе с областью низкого давления, непосредственно наблюдая ее развитие. Самолеты оснащены разнообразными метеорадиолокационными установками и новой доплеровской системой, позволяющей наблюдать движение частиц влаги. Исследовательский



полет длится обычно до 10 часов.

По наблюдениям, «арктические ураганы» занимают полосу до 150 км шириной, а скорость ветра в них достигает примерно 130 км/ч. Возможно, некоторые из них, подобно тропическим ураганам, имеют «глаз бури». По-видимому, зарождаются «арктические ураганы» в районах, где открытые и относительно теплые воды океана внезапно подвергаются сильному воздействию холодных масс арктического воздуха.

New Scientist, 1984, v. 101, № 1396, p. 9 (Великобритания).

Метеорология

Наводнения зависят от Солнца!

Сотрудники Индийского института тропической метеорологии изучили данные, характеризующие ежегодные муссоны на п-ове Индостан за период с 1891 г. по настоящее время, и сопоставили их с наблюдениями солнечной активности. Они обнаружили тенденцию к чередованию засух и наводнений в этом регионе через один 11-летний цикл солнечной активности.

Магнитные полюса Солнца, а с ними и направленность его магнитного поля изменяется, как известно, каждые 11 лет. Астрофизики считают поэтому более важным во многих отношениях 22-летний, так называемый двойной, цикл солнечной активности. Объяснения механизма ее связи с метеорологическими процессами на Земле пока еще не найдено. Однако, независимо от этого, открытие такой корреляции может быть весьма полезным для долгосрочного прогноза муссонов, наводнений и засух, которым так подвержен Индостан. Период следующего солнечного цикла, максимум которого придется на начало 90-х годов, может оказаться в этом регионе засушливым.

New Scientist, 1984, v. 101, № 1407, p. 17 (Великобритания).

Метеорология

Надежность метеопрогноза в США

Зима 1983/84 г. была второй подряд, когда выработанный Национальной метеорологической службой США прогноз на сезон оказался в корне неверным. Специалисты объясняют это непредвиденными крупномасштабными атмосферными явлениями, резко изменившими погоду на срок продолжительностью в целый сезон. Таким явлением зимой 1983/84 г. было вторжение на территорию США больших масс арктического воздуха. Это привело к рекордно низким температурам в декабре и определило непредсказуемый характер погоды в январе и феврале. Однако в декабре, с учетом реального хода событий, в прогноз были внесены исправления, и новый трехмесячный прогноз (включавший март 1984 г.) оказался правильным.

Обычно Метеослужба США ежемесячно дает прогноз на три месяца. В конце каждого такого периода производится численная оценка его фактической оправдываемости. По используемой шкале оценка 100 баллов означает стопроцентное совпадение реальных погодных условий с прогнозируемыми; оценка ноль баллов означает, что прогноз был не более точным, чем можно было бы ожидать, исходя лишь из общих климатологических данных; обычными являются оценки между 10 и 15 баллами.

Ноябрьский прогноз получил оценку 5 баллов. Прогноз на предыдущую зиму, «скомпрометированный» неожиданным вмешательством явления Эль-Ниньо, занимает по этой шкале 14-е место. Интересен факт, что, если не считать двух последних зим, трехмесячные прогнозы на этот сезон оказываются, как правило, более точными, чем на другие времена года.

EOS (Transactions of the American Geophysical Union), 1984, v. 65, № 20, p. 354—355 (США).

Климатология

От холодной зимы к ледниковому периоду!

Перед климатологами давно стоит вопрос, насколько значительно отличается характер циркуляции атмосферы во время ледникового периода от настоящего времени и какова вероятность превращения нынешнего характера циркуляции в «ледниковый».

Т. Краули (Т. Crowley, Университет штата Миссури, Сент-Луис, США), анализируя метеорологические данные за ряд десятилетий, заметил, что в период между 1899 и 1975 гг. более 75 % зим подпадают под один из четырех типов атмосферной циркуляции. Наиболее существенный для данного вопроса тип, именуемый «высоким гренландским», характеризуется тем, что средние температуры в Гренландии и западной части Северной Америки превышают средние многолетние нормы; это сопровождается относительно низкими температурами в Западной Европе и восточной части Северной Америки. Струйные течения в высоких слоях атмосферы приобращают в этих случаях зигзагообразный рисунок в плане. Влажные воздушные массы, приходящие в указанные районы континентов, быстро охлаждаются и «разгружаются» обильными снегопадами. Именно такой тип циркуляции был характерен для 19 % зим в период 1899—1975 гг., а также для зимы 1976/77 гг. и именно такая циркуляция идеальна для возникновения ледниковых эпох.

Краули полагает, что подобная глобальная циркуляция атмосферы устанавливается относительно легко, и делает вывод, что для наступления ледникового периода в Северном полушарии достаточно слабого импульса, сравнимого, например, с очень «суровой» и длительной зимой, которые иногда случаются в наше время. Пример тому — похолодание в Европе в XVII в., которое нередко называют Малым ледниковым периодом.

Quaternary Research, 1984, v. 21, p. 105 (США);



История и эстетика русских садов

А. К. Скворцов,
доктор биологических наук
Москва



Д. С. Лихачев. ПОЭЗИЯ САДОВ. К семантике садово-парковых стилей. Л.: Наука, 1982, 343 с.

Труды академика Д. С. Лихачева по русской истории и литературе достаточно широко известны. Их автор обладает счастливой способностью подать проблемы минувших эпох в таком свете, под таким новым углом зрения и изложить их так ясно и понятно, что они становятся интересными и волнующими для широкого круга читателей, даже совсем не специалистов. Хорошо помню, как еще 30 с лишним лет тому назад я был буквально покорен написанной Д. С. Лихачевым сопроводительной статьей к изданию «Повести временных лет». Потом появились столь же замечательные «Человек в литературе Древней Руси» и «Поэтика древнерусской литературы»... И вот теперь — «Поэзия садов», сочинение, которое в известной степени затрагивает и интересы моей специальности, что дает мне смелость выступить с настоящей рецензией.

Поэзия и сады... В сочетании этих слов нет, конечно, ничего неожиданного. У кого же

слово «сад» не вызывает поэтических ассоциаций! Да, наверно, и немного можно насчитать поэтов, которые бы никогда и ничего не сказали о садах. Поэтому, увидев заглавие книги «Поэзия садов», можно было бы ожидать, что в ней мы найдем что-нибудь вроде комментированной антологии или же литературоведческого очерка на тему «поэты о садах» или «сады в поэзии». Но уже подзаголовок «К семантике садово-парковых стилей» показывает, что содержание книги далеко выходит за рамки чистого литературоведения. Как поясняет автор в своем предисловии, задача книги — «продемонстрировать принадлежность садов и парков определенным стилям в искусстве в целом». А каждый стиль есть проявление определенной системы эстетических взглядов, «эстетического климата» эпохи, «художественного сознания» общества. И вот книга Д. С. Лихачева есть «попытка подойти к садовым стилям как к проявлениям художественного сознания той или иной эпохи, той или иной страны».

Почему же все-таки в заглавии книги — поэзия? Ответ находим в довольно обширном «Введении» (с. 5—35). «Садовое искусство всегда было своеобразным соединением различных искусств — собственно садоводства, архитектуры, живописи и поэзии» (с. 22). И по убеждению Д. С. Лихачева, ценителя и знатока поэзии, «из всех искусств садово-парковое искусство, пожалуй, теснее и постоянное всего связано именно с поэзией» (с. 22). «Устроители садов и парков стремятся воздействовать на все человеческие чувства, создавая некие эстетические комплексы... Но если попытаться все же выделить основное, наиболее значительное в садах, — то это конечно их семантика; и семантика сближает садово-парковое искусство прежде всего с поэзией» (с. 24). Сад «говорит» своей стилистической системой, символикой своих элементов. Но вместе с тем он и немой, и он «нуждается в том, чтобы кто-то (поэты, прозаики) стал за него говорить» (с. 23).

Так расшифровывается то сочетание заглавия книги и подзаголовка, которое поначалу несколько озадачивает читателя: поэзия — и она же семантика. Как видим, и поэзия и семантика понимаются автором книги достаточно широко.

Что же касается «зеленой архитектуры», то, по убеждению Д. С. Лихачева, в садово-парковом искусстве она «не только не является единственным слагаемым, но даже и не доминирующим» (с. 24). Таким образом, в противовес обычному взгляду на сады и парки как на сочетание двух элементов, или взаимодействие двух полюсов: садоводства и архитектуры, выдвигается в качестве основного и ведущего третий полюс — эстетическая (или поэтическая) семантика. Для большей выразительности своей точки зрения автор книги даже сами слова «зеленая архитектура» и «зеленое строительство» употребляет не иначе, как только в кавычках. А самый ходовой ныне термин «озеленение» в книге совсем отсутствует (что и понятно: если трудно принять уже «зеленую архитектуру», то от «озеленения» и вовсе можно позеленеть).

Книга посвящена в основном русским садам. Из остальных стран и эпох внимание уделено только тем, которые повлияли на русское садово-парковое искусство и могут помочь что-то объяснить в особенностях русских садов. В главе I рассматриваются, насколько позволяют скудные сохранившиеся источники, сады Древней Руси и отмечается их идейное родство с садами позднего западного средневековья. Глава II рассматривает западноевропейские сады ренессанса, барокко и классицизма. Особое внимание уделено голландскому барокко, поскольку, как показывает автор, именно оно явилось основным источником формирования стиля русских садов предпетровской (XVII в.) и петровской эпохи. Рассмотрению этих последних посвящена глава III.

Самое большое место в книге отведено романтизму, «ибо его значение в русском

садовом искусстве было особенно велико» (с. 3). Основная черта садов романтизма — их пейзажный характер. Однако автор показывает, что пейзажный элемент присутствовал в садах в той или иной форме уже задолго до эпохи романтизма; этой предыстории посвящена вся IV глава книги. Хотя пейзажный сад в основном развился в Англии в XVIII в. и идеологами и пропагандистами его были преимущественно англичане, как садовники, так и поэты (среди последних особенно Александр Поп), тем не менее на становлении и развитии пейзажного сада существенно сказались и влияние искусства французского классицизма (особенно живописи Пуссена и Лоррена); да и сад французского рококо был уже в значительной мере пейзажным (в чем можно убедиться, судя хотя бы по картинам хорошо представленных в наших музеях художников той эпохи — Ватто, Ланкре, Буше и др.).

Вместе с тем садам романтизма был свойствен не только пейзажный характер, но и целый ряд других особенностей, которые подробно рассматриваются в главе V. Главная особенность — в том, что романтизм от ориентации на четкий, сразу обозримый и постоянный план сада перешел к ориентации на изменяющийся облик сада. И двигаясь по саду, и созерцая сад в разное время дня и разное время года, посетитель видел его все время иным. Сад должен был навевать на гуляющих в нем чувствительность, меланхолию, воспоминания. Отсюда особенное внимание к старым деревьям, руинам, гротам, мемориальным сооружениям. В качестве дополнения к главе о романтизме дан интересный этюд «Пушкин и сады Лицея».

Приведенный выше беглый обзор содержания книги Д. С. Лихачева — не более как бледная аннотация. Книга и богата мыслями, и плотно набита фактическим материалом — подкрепляющими эти мысли цитатами и ссылками на источники. Поэтому, несмотря на свойственный автору простой и ясный язык, чтение книги никак не назовешь развлекательным. Это же не позволяет и вдаваться в более подробное рассмотрение отдельных глав.

Вместе с тем относительно книги в целом некоторые замечания хочется высказать.

Прежде всего: удалось ли автору книги последовательно, с точки зрения выдвинутого им «третьего полюса» изложить историю садово-паркового искусства на избранном отрезке — от позднего западного средневековья до русского романтизма первой половины XIX в.? Несомненно удалось. И это, конечно, серьезный аргумент в пользу признания правомочности этого третьего полюса. Пусть точка зрения Д. С. Лихачева — крайняя (как и подобает полюсу), но оспорить ее право на существование нельзя. Очевидно, надо признать, что достаточно полная и глубокая характеристика и истории садово-паркового искусства и каждого сколько-нибудь значительного произведения этого искусства должна быть не двухполюсной (т. е. садовые растения и садоводческие приемы плюс архитектурно-планировочное решение), а трехполюсной (т. е. еще плюс идейно-эстетическая семантика).

Нельзя, конечно, сказать, что историки садово-паркового дела и историки архитектуры вообще не затрагивали «позиции» или «семантики» (как их понимает Д. С. Лихачев) садов и парков. Неизбежно в какой-то мере затрагивали. В частности, и влияние поэтов на формирование садовых стилей, которому так много внимания уделяет Д. С. Лихачев, было отмечено рядом исследователей; особенно указывалось на значение Петрарки для садов раннего ренессанса и Александра Попа — для садов романтизма¹.

На мой взгляд, предпринятая в свое время попытка Н. И. Брунова² выявить в архитектурных стилях и эпохах идейно-эстетическую семантику была весьма родственна целям, поставленным перед собой Д. С. Лихачевым в отношении садового искусства.

Но нельзя и не признать, что эстетико-семантические ха-

рактеристики садов и парков в литературе чаще всего фрагментарны и теряются в массивах обычно довольно эклектичных контекстов, основу которых составляют описания планировки садов и использования «малых архитектурных форм» и отдельных садоводческих приемов; излагается материал, как правило, по странам и хронологическим эпохам. Таковы, в частности, и самые известные фундаментальные труды Марии-Луизы Готхейн³ и В. Я. Курбатова⁴, а равно и новая книга Е. Хайемса⁵. И уже вовсе неудовлетворительно примитивное, но весьма распространенное даже среди архитекторов и садовых работников низведение всего эстетического богатства и разнообразия садов к различению всего лишь «регулярной французской» и «ландшафтной английской» планировки.

По-видимому, Д. С. Лихачев действительно первый — по крайней мере в отечественной литературе — смог представить целый значительный фрагмент истории садово-паркового искусства последовательно с точки зрения идейно-семантического анализа. Автор показал нам существенный элемент в садах прошлого, который мы забыли и разучились читать, но который надо уметь читать, чтобы более полно понять и оценить сады прошлого, чтобы наиболее осмысленно их сохранять и реставрировать.

Проблема сохранения и реставрации исторических и художественных памятников, в том числе садов и парков, сейчас весьма актуальна. На это дело тратятся большие средства. И вместе с тем мы постоянно встречаемся с промахами, подчас очень грубыми. Вот некоторые мои недавние впечатления. Лесопарковая зона Пятигорска. На живописном обры-

³ Gothein M.-L. Geschichte der Gartenkunst, 2 Bde. Jena, 1914 (3. Aufl. 1926; Nachdruck, 1977; English transl.: A history of garden art. L., 1928, reprint 1979).

⁴ Курбатов В. Я. Сады и парки. СПб., 1916.

⁵ Hyams E. A history of gardens and gardening. L., 1971.

¹ См., напр.: Masson G. Italian gardens. L., 1961; Hyams E. English garden. L., 1964.

² Брунов Н. И. Очерки по истории архитектуры. Т. 1, 2. М.—Л., 1935, 1937.

ве — беседка «Золова арфа». После войны она реставрирована, но без золотой арфы, а вместо того с непрерывным электронным воспроизведением одной и той же звукозаписи. Экскурсоводы говорят, что так «даже лучше»... Около того же Пятигорска — место дуэли Лермонтова. Опушка леса, широкий вид на долину, памятный обелиск — все очень гармонирует с настроением посетителя. Но совсем близко выстроен большой загородный ресторан — и уже тут настроение совсем другое и совсем другие несутся голоса!... Никитский сад, великолепный пейзажный парк, жемчужина Южного берега Крыма. Замечательной особенностью сада было то, что он сходил прямо к морю, и живописный «дикий» берег моря служил естественным и неотъемлемым завершением природного и паркового ансамбля. И вот, несколько лет тому назад неотъемлемое оказалось отнятым: сад отгородили от моря забором, а сам берег заложили мощным слоем бетона. Получены ли от этого кем-либо какие-либо выгоды — не знаю; но мне кажется, что никакие выгоды не стоят потерянному. Точно так же замечательный парк «Александрия» в Белой Церкви оказался отрезанным от своего исконного естественного завершения — берега реки Рось: приречную террасу заняли рыбоводные сооружения, на которые не то что посетителям, а и сотрудникам дендропарка вход закрыт. Выгода в использовании территории — но не выгода ли это тришкина кафтан?

Острой проблемы сохранения и реставрации садов и парков Д. С. Лихачев, понятно, не мог обойти. В разных главах книги рассеяны отдельные замечания о неудачах в реставрации парков Ленинграда и его пригородов, иногда довольно едкие, как, например, по поводу такого современного употребления материала для дорожек, какого раньше «никогда не существовало»: засыпки дорожек в Петродворце и в Пушкине осколками фарфоровой посуды, иногда с ручками или носиками чайников. В конце книги дан специальный небольшой параграф, посвященный реставрации.

Автор, естественно, считает недопустимым всякое про-

извольное и бездумное изменение исторического лица парка. Нужно «хранить малейшую особенность старого сада, которая при отсутствии исторической точки зрения на нее могла бы показаться пустой и ненужной» (с. 10). Вместе с тем он подчеркивает, что вовсе не следует непременно пытаться реставрировать сады так, как они выглядели в «оптимальный момент» их существования. Такой момент трудно установить; нельзя и просто отбросить ни все последующие исторические наслоения, ни игнорировать современное положение, окружение и использование сада. Сад живет, и надо стремиться не к тому, чтобы вернуть эту жизнь вспять, к какому-то избранному моменту и законсервировать ее, а, наоборот, к тому, чтобы продлить жизнь, при этом по возможности сохранив все документальные свидетельства прошлого. С таким подходом нельзя не согласиться. Небольшой пример: нынешняя территория филиала Ботанического сада Московского университета (на проспекте Мира) — прямой наследник основанного Петром I в начале XVIII в. Аптекарского огорода. До настоящего времени на ней сохранились высокая старая липовница, по преданию, посаженная самим Петром, и огромной толщиной ветла примерно того же времени. Эти два исторических дерева буквально «держат» собой весь сад; их, конечно, всячески берегут, и беречь их надо. Но всему саду, хотя он и очень невелик, возвращать облик начала XVIII в. было бы, конечно, бессмысленно.

Впрочем, могут быть и такие случаи, когда, наоборот, оправданно и желательно полное возвращение к прошлому и полная консервация сада, придающая саду уже чисто музейный характер. Таков, например, сад в усадьбе Карла Линнея в Упсале: он восстановлен и поддерживается именно таким, каким был при жизни Линнея в 1770—1780-х гг.

То, что не сохранилось (или что нельзя сохранить) в натуре, надо, как совершенно справедливо говорит автор, показывать в музее. «Садовые музеи — вот самый действенный и интеллигентный способ сохра-

нить память о былой красоте ценнейших наших садов» (с. 340). Важная и своевременная мысль.

Рассмотрение истории русских садов и парков автор заканчивает эпохой романтизма, т. е. первой третью XIX в. (в поэзии это Карамзин, Жуковский, Веневитинов, молодой Пушкин). И лишь отчасти затрагивает последние отзвуки романтизма в садах русских помещичьих имений конца века (дополнительный параграф «Темные аллеи»). А что же дальше? Кончилась ли история садов вообще? Или же кончилась семантическая и поэтическая содержательность этой истории? Или просто автор не интересовался новейшей историей и не собирал материалов для ее рассмотрения? Полного и определенного ответа я в книге не нашел. Но по отдельным разбросанным высказываниям автора можно заключить, что он склоняется ко второму варианту ответа: история продолжается, но поэтической семантики в ней больше нет. «Сады утратили свое органическое родство с поэзией» (с. 12). И о «конце садового-паркового искусства «как искусства» говорится как о чем-то уже относящемся к прошедшему времени» (с. 336). Т. е. как в чеховской пьесе: романтический вишневый сад перестал существовать, а приходящие на его место меркантильные сады дачников лишены поэзии.

В эмоциональном плане автора вполне можно понять: очевидно, что ему дороже всего романтизм, и вся предшествующая история садов рисуется как движение к романтизму. Но романтизм, едва достигнув высшего расцвета, тоже канул в Лету. А на смену ему пришел тропливый меркантильный эклектизм. Как же не подумать о «конце садового искусства как искусства»? Но это с эмоциональных позиций. А если подойти с рациональных, то с автором нельзя согласиться. Тезис автора — что сады отражают эстетический климат эпохи — сохранил силу и применительно к послеромантическому периоду. Ведь и в архитектуре на смену высокому стилю — ампиру — пришел эклектицизм с его различными вариантами «псев-

до»-стилей, а в живописи проявился такой калейдоскоп, за темпами которого садовое дело, конечно, и думать не могло угнаться.

Как замечает автор, набор компонентов садового искусства сравнительно невелик и мало менялся от эпохи к эпохе. Ограды, дорожки, газоны, аллеи, одиночные деревья и различные группы, кустарники, цветочные куртины и грядки, скульптуры, беседки, галереи, павильоны, обелиски, надписи, вазы, скамьи, фонтаны, каскады, ручьи, пруды, волтеры для животных, разные развлекательные устройства — почти все это было в каждом садовом стиле, но менялись соотношения и менялся смысл. Стоит и сейчас зайти в любой парк, и почти все это можно увидеть. Другое дело, что теперь все это как будто не составляет какой-либо семантической системы, а стало быть, и «прочсть» нечего. Тем более что часто отсутствует даже элементарная эстетичность, элементарный вкус (от чего острословы и говорят про некоторые «парки культуры и отдыха», что в них нет ни парка, ни культуры, ни отдыха). Но это не отменяет задачи эстетического анализа садов и парков, выявления современных эстетических принципов и мотивов и в конечном счете — создания современных высокоэстетичных парков. Скорее, наоборот, делает эту задачу особенно актуальной. И к этой мысли, помимо намерений автора, книга Д. С. Лихачева, несомненно, приводит.

Автор книги отмечает, что от ренессанса к романтизму се-

мантичность садов падает, а эмоциональность возрастает. С середины же XIX в., считает он, падает и то и другое. Но действительно ли падает эмоциональность? Не находит ли она просто другое выражение? А если падает, то, быть может, возрастает еще что-то, чего мы еще не можем сформулировать? Ведь, например, произведения абстрактной живописи и скульптуры гораздо труднее понять и правильно оценить, чем произведения других стилей; в абстрактном искусстве и гораздо труднее достичь подлинных творческих высот. Не сходно ли обстоит дело и с современным садово-парковым искусством?

Я треть столетия, больше половины всей моей жизни, проработал в учреждениях, называемых садами: в Ботаническом саду Московского университета и в Главном ботаническом саду АН СССР в Москве. И вот в одном отношении книга Д. С. Лихачева задела меня буквально за живое. Она заставила задуматься: а как же учреждения, называемые садами, проявляют себя в вопросах, рассматриваемых в этой книге?

К собственному изумлению, я оказался перед ответом: в сущности никак. За тридцать лет и три года я просидел сиднем на всевозможных заседаниях семинаров и советов несметное количество часов. Мы обсуждали вопросы интродукции, коллекций, экспозиций, экспедиций, ассортимента, охраны растений, их устойчивости, размножения, внедрения, озеленения... Но ни одного случая обсуждения истории или эстетики садово-паркового дела я не смог

припомнить. (Может, случаи и были, но в мое отсутствие и не настолько существенные, чтобы о них потом вспоминать.) Капитальную сводку М.-Л. Готтгейн по истории садового искусства, которую я взял в нашей библиотеке, до меня брал еще только один читатель в 1962 г. (хотя в нашу библиотеку часто обращаются и сотрудники других садов). Книг же В. Я. Курбатова и Д. С. Лихачева в библиотеке вовсе не оказалось... Многие мои авторитетные коллеги постоянно настаивают, что тематика сада должна быть отнюдь не вообще ботанической, а специфически «садовой», и поэтому с известным ограничением ботаники в ботанических садах я давно свикся. Но вот и с «садовой» стороны диапазон интересов сада тоже оказывается существенно ограниченным, и это огорчительно. Быть может, специальную эстетическую тематику нам разрабатывать и не обязательно. Но, наверное, было бы нелишнее, если бы научные сотрудники ботанических садов ориентировались в истории и эстетике садово-паркового дела несколько лучше среднего посетителя сада. Книга Д. С. Лихачева подводит и к такой мысли.

О книге и в связи с ней можно было бы еще много говорить, но рецензия и так уже получилась длинна. Завершая ее, необходимо еще отметить обилие интересных иллюстраций, а также прекрасное полиграфическое исполнение книги и непостижимо малый тираж (9950 экз.). И поблагодарить Д. С. Лихачева за столь содержательную и побуждающую ко многим размышлениям книгу.

НОВЫЕ КНИГИ

Астрономия

А. А. Михайлов. ЗЕМЛЯ И ЕЕ ВРАЩЕНИЕ. М.: Наука, Главн. ред. физико-математической литературы (Библиотечка «Квант», вып. 35), 1984, 80 с., ц. 15 к.

Автор этой научно-популярной книги — старейший советский астроном академик Александр Александрович Ми-

хайлов, многие годы бывший директором Пулковской обсерватории. Уделяя большое внимание популяризации науки, он считал эту область своей работы важной предпосылкой долголетия. Умер А. А. Михайлов 29 сентября 1983 г. в возрасте 95 лет, до последних дней продолжая работать над книгой «Земля и ее вращение».

На первый взгляд, тема

ее может показаться частным вопросом. Однако с древних времен и поныне пору он находится чуть ли не в центре научного знания. О шарообразности Земли учил еще в VI в. до н. э. греческий математик и философ Пифагор. Первое дошедшее до нас измерение окружности Земли было проведено за 250 лет до н. э. греческим геометром Эратосфеном.

Книга А. А. Михайлова убеждает в том, что нигде история науки не переплетается так тесно с историей человечества, как в развитии знаний о Земле. По движению Солнца, обусловленному вращением Земли, люди стали измерять время. Великие географические открытия совершались одновременно с развитием наших знаний о движении небесных светил, по которым ориентировались мореплаватели.

Основная часть книги посвящена обсуждению проблемы на современном уровне. В наши дни возросшая точность измерений позволяет изучать особенности вращения Земли, связанные с движением атмосферы, лунными приливами, землетрясениями. Возникшие в последние десятилетия новые радиотехнические и светолокационные методы наблюдений объектов Вселенной позволяют с сантиметровой точностью рассчитывать земную систему координат. В результате, как показывает автор, на качественно новый уровень будут поставлены работы по космической геодезии и навигации, планетарной геофизике, прогнозу землетрясений и глобальной тектонике плит.

Астрофизика

П. Р. Амнуэль. НЕБО В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ. М.: Наука, Глав. ред. физико-математической литературы, 1984, 224 с., ц. 80 к.

До недавнего времени (положение начало существенно меняться лишь немногим более тридцати лет назад) понятие «астрономические наблюдения» было тождественно понятию «оптические наблюдения неба». Между тем еще В. Гершель в самом конце XVIII в. открыл излучение Солнца, лежащее за пределами видимого спектра (это было инфракрасное излучение). В 1881 г. И. Риттер обнаружил у нашей звезды ультрафиолетовое излучение. В обоих случаях природа излучения оставалась неясной. Радиоволны и рентгеновские лучи были открыты в конце XIX в., однако «астрономии невидимого» суждено было возникнуть лишь полвека спустя.

Первые наблюдения неба в рентгеновских лучах были проведены в 1948 г. с помощью ракеты, поднятой на высоту 200 км. Так впервые было зарегистрировано рентгеновское излучение Солнца, и на карте рентгеновского неба появился первый «материк».

Сейчас исследование Вселенной в жестком диапазоне длин волн проводится рядом стран с помощью специальных рентгеновских спутников. Чувствительность детекторов увеличена настолько, что удалось зарегистрировать рентгеновское излучение вначале за пределами Солнечной системы, а теперь уже и вне нашей Галактики.

Рентгеновская астрофизика бурно развивается и изобилует многочисленными открытиями. В книге популярно рассказано об исследовании рентгеновских источников в двойных звездных системах, о рентгеновском излучении от остатков вспышек сверхновых звезд, о рентгеновских барстерах и т. п. Читатель получит представление о физической природе объектов, являющихся рентгеновскими источниками, о характере их излучения, о связи рентгеновской астрофизики с другими разделами астрофизической науки.

«...Недалеко время, — пишет автор в заключение, — когда астрономы перестанут делить излучение на диапазоны, когда небо откроется сразу всеми цветами. Небо в рентгеновских лучах прекрасно — но мы увидим небо и поразимся, и застынем на некоторое время, впитывая увиденное. А потом — за работу».

История. Археология

ДРЕВНИЙ И СРЕДНЕВЕКОВЫЙ ВОСТОК: ИСТОРИЯ, ФИЛОЛОГИЯ. Отв. ред. Д. Д. Васильев, С. В. Волков, М.: Наука, 1984, 262 с., ц. 1 р. 60 к.

В сборнике статей, подготовленном Советом молодых ученых Института востоковедения АН СССР, исследуются различные аспекты истории обширного региона — от Ближ-

него Востока до Центральной Азии. Основной упор сделан на вопросы источниковедения, причем имеются в виду как письменные, так и археологические источники. Ряд исследований представляет интерес не только для востоковедов, но и для специалистов других областей знания.

Например, статья А. В. Варенова посвящена разбору китайской историографии так называемого звериного стиля — одной из самых актуальных проблем археологии Евразии. Полемизируя с точкой зрения У. Зня, он подчеркивает важность контекста, в составе которого обнаружены предметы звериного стиля и опровергает попытку обособить эти находки Северного Китая от аналогичного искусства других районов.

А. Л. Вассоевич в одной из своих статей анализирует древнейшие упоминания о нефти в вавилонско-ассирийских текстах. Нефть не только была известна жителям Междуречья, но и специально добывалась колодезным способом, использовалась в качестве оружия и топлива. Ее применяли также для целей магии и в медицине¹.

Интересна работа С. В. Зинина, который на примере древнего Китая разбирает предисторию становления научных знаний. Уникальным памятником той эпохи является «И цзин». Это сочинение зафиксировало способ гадания шаманов («у»), постепенно вытеснивших гадателей на черепаших панцирях («бу»). В практической деятельности «у», связанных с врачеванием, наблюдением за небесными телами и т. д., автор усматривает истоки традиционной науки.

¹ См. также: Вассоевич А. Л. О происхождении слова «нефть». — Природа, 1978, № 5, с. 159.

Старинные чертежи Москвы

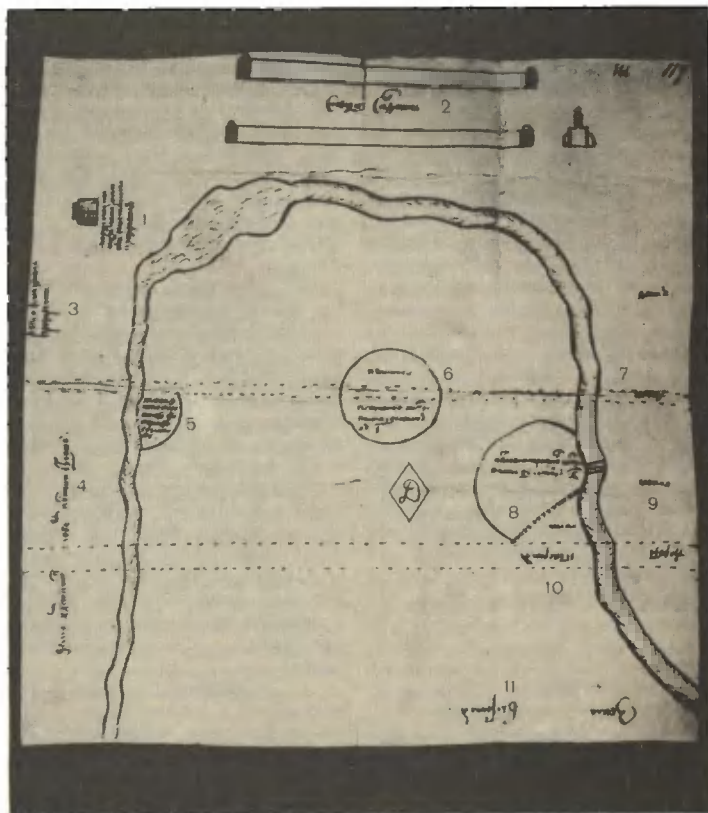
В. С. Кусов,
кандидат технических наук
Москва

Неповторимое обаяние внешнего облика Москвы составляет исторически сложившаяся пестрота ее застройки: запутанные старинные переулки вливаются в широкие современные магистрали, замечательные древнерусские храмы соседствуют с домами-башнями из стекла и бетона. Для наших дней характерно более острое, чем прежде, ощущение прелести этой «разностильности», воплощенной в себе кипучую жизнь естественно развивающегося древнего города, более осознанное стремление сберечь все то, на чем лежит печать минувших событий, былой культуры, быстро меняющегося быта.

Каждому, кто привязан к Москве и ее истории, хотелось бы включить в сферу охраны и старинные названия ее улиц, площадей, переулков, часто говорящие о том, чему уже нет материальных свидетельств. Тем более дорога нам любая возможность объяснить и просто уточнить эти названия — топонимы — или получить дополнительные штрихи к сменявшим одна другую картинам старинной Москвы и ее окрестностей.

В Центральном государственном архиве древних актов мне посчастливилось найти два неизвестных ранее картографических изображения территории современной Москвы, относящихся к XVI в.

Первый чертеж, аккуратно выполненный пером и чернилами на почти квадратном листе бумаги (30×31 см) западноевропейского производства, хранится в фонде Тайного приказа Алексея Михайловича. В архивной описи документ назван так: «Окрестности села Пушкина Петровского монастыря». В действительности изображено не село,



Чертеж земель Петровского монастыря по Тверской дороге, выполненный в XVII в. Надписи на чертеже: 1 — Астрадамово князя Михайловской жены княж Семенова сына Прозоровского; 2 — слобода салдацкая (Бутыринская); 3 — роща Семчинская Прозоровских; 4 — земля Архангельского собору пустоши Отцовской; 5 — Татьяна Петровского м-ря перелог 6 десяти; 6 — Пушкино Петровского м-ря пашни десяти с 10; 7 — дорога в село Аксиньино и в кны; 8 — Маслово Петровского м-ря пашни десяти с 20; 9 — ямская [земля Тверской ямской слободы]; 10 — дорога Тверская; 11 — земля выгонная. Д — примерное положение современного стадиона «Динамо».

а пустошь с таким же названием. (Под пустошью в XVI в. понимали не заброшенный пустырь, а участок местности, активно используемый в сельском хозяйстве.) На территории современной Москвы села Пушкина никогда не бывало, потому-то, наверное, чертеж этот и не привлекал интереса.

При первом же внимательном взгляде на этот древний рисунок ошибка снимается сама собой. Дело в том, что обязательным графическим символом села являлось изображение церкви, подобное тому, какое мы видим в правой верхней части чертежа около надписи «слобода салдацкая». Такого значка рядом с топонимом «Пушкино» (в центре чертежа)



Петровский путевой дворец на Ленинградском шоссе, построенный по проекту М. Ф. Казакова в 1773—1782 гг. Свое название дворец получил от села Петровского, а село — от земель Петровского монастыря, которые изображены на древнем чертеже.

нет. Поэтому настоящий лист следовало бы назвать примерно так: «Чертеж земель Петровского монастыря по Тверской дороге».

Для того чтобы облегчить «привязку» старинного чертежа к современной территории, я указал на нем примерное местоположение стадиона «Динамо» на Ленинградском проспекте (бывшей Тверской дороге). Еще один простой ориентир — уже упомянутая здесь «слобода салдацкая». Автор чертежа, несомненно, имел в виду Бутыркинскую слободу. (Именно так, а не Бутырской, называлась она в XVII в.)

От Бутыркинской слободы сохранилась часть церкви Рождества Богородицы, воздвигну-

той в 1680 г. В недалеком будущем она будет реставрирована, и Бутырскую улицу — бывший участок древней Дмитровской дороги — украсит памятник древнерусской архитектуры. На месте этой церкви существовала более старая постройка. Она-то и обозначена на чертеже.

До наших дней дошло несколько имеющихся на чертеже топонимов. Деревня Астрадамово, как там указано, принадлежала «князь Михайловской жене княж Семенова сына Прозоровского», т. е. жене князя Михаила Семеновича Прозоровского. Астрадамово и соседнее село Семчино — в будущем Петровско-Разумовское — в середине XVII в. были вотчиной боярина Семена Прозоровского, известного участием в составлении «Уложения 1649 года» и переговорами с гетманом Хмельницким. В 1660 г., после смерти Семена Прозоровского, его земли перешли к сыновьям. В июне 1670 г. Михаил Прозоровский убит в бою с войсками Степана Разина в Астрахани,

и с 1670 г. деревня Астрадамово принадлежит уже вдове Михаила Прозоровского. Следовательно, 1670 г. — нижняя возможная дата составления нашего чертежа.

В 1676 г. Астрадамово и соседние земли пустоши Отцовской (будущее село Всехсвятское) стали собственностью боярина И. М. Милославского. Так что 1675 г. — верхняя возможная дата составления чертежа.

В районе древнего Астрадамова сохранились Астрадамская улица и два Астрадамских переулка. Теперь очевидно ошибочность попыток объяснить происхождение этих топонимов от Амстердама и голландцев, якобы приглашенных Петром I для организации сельскохозяйственных предприятий нового типа (напомним, дата рождения Петра — 1672 г.).

Пустошь Маслово дала имя улицам — Верхней и Нижней Масловкам, первая примерно совпадает с приведенной на чертеже «дорогой» в сельцо Аксиньино и в иные». На территории бывшего сельца теперь



Памятник гражданской архитектуры XVII в. — палаты думного дьяка Аверкия Кириллова на Берсеневской набережной. Споры Аверкия с властями Большого Успенского собора Московского Кремля обязало появление чертежа земель по речке Гравороньке.

парк Дружбы и дворец спорта «Динамо», построенный к открытию Московской олимпиады 1980 г.

Между пустошами Татьянино и Пушкино на землях Петровского монастыря в XVIII столетии появится сельцо Зыково, затем оно станет Петровским, исчезнут пустоши и сельцо, топоним же будет жить в названиях замечательного творения зодчего М. Ф. Казакова — Петровского путевого дворца и

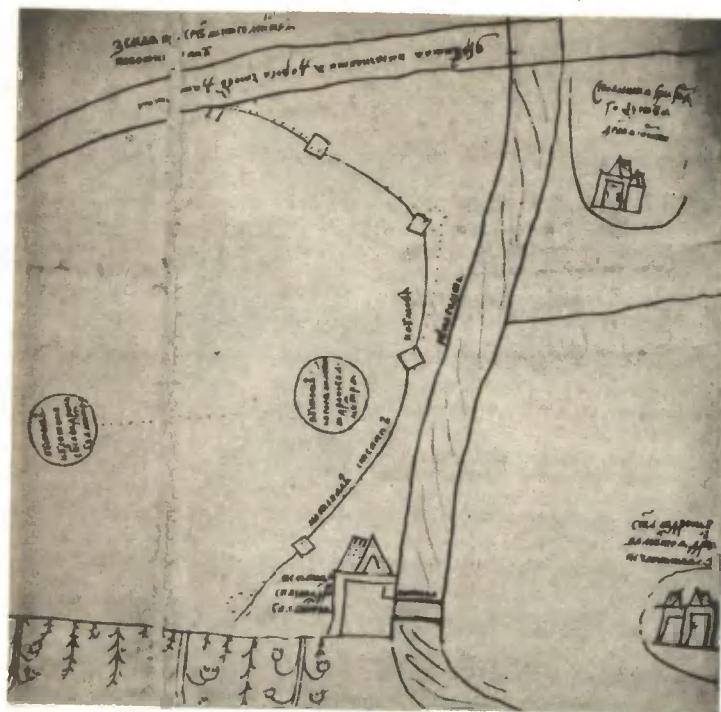
Петровского парка (1775—1782 гг.).

Зачем, для какой цели был составлен этот чертеж — древнейший портрет одного из уголков нашей столицы? Пока неизвестно. Некоторый просвет в этом отношении намечает надпись в нижней части чертежа: «земля выгонная». Согласно известному «Уложению 1649 года», правительство установило четырехверстную зону вокруг Земляного города (нынешнего Садового кольца) для использования жителями Москвы под выгон. Однако к середине XVII столетия в этой зоне уже существовала значительная городская застройка. Поэтому процесс отведения земель под выгон оказался очень трудным и растянулся на несколько десятилетий, несмотря на строгую однозначность указа: «А выгону быти около Москвы на все стороны от Земляного города оторву на две версты, а отмерити те выгоны новой саженью, которая сажень по государеву указу сделана в 3 аршина, а в версте учинити по тысячи сажен»¹.

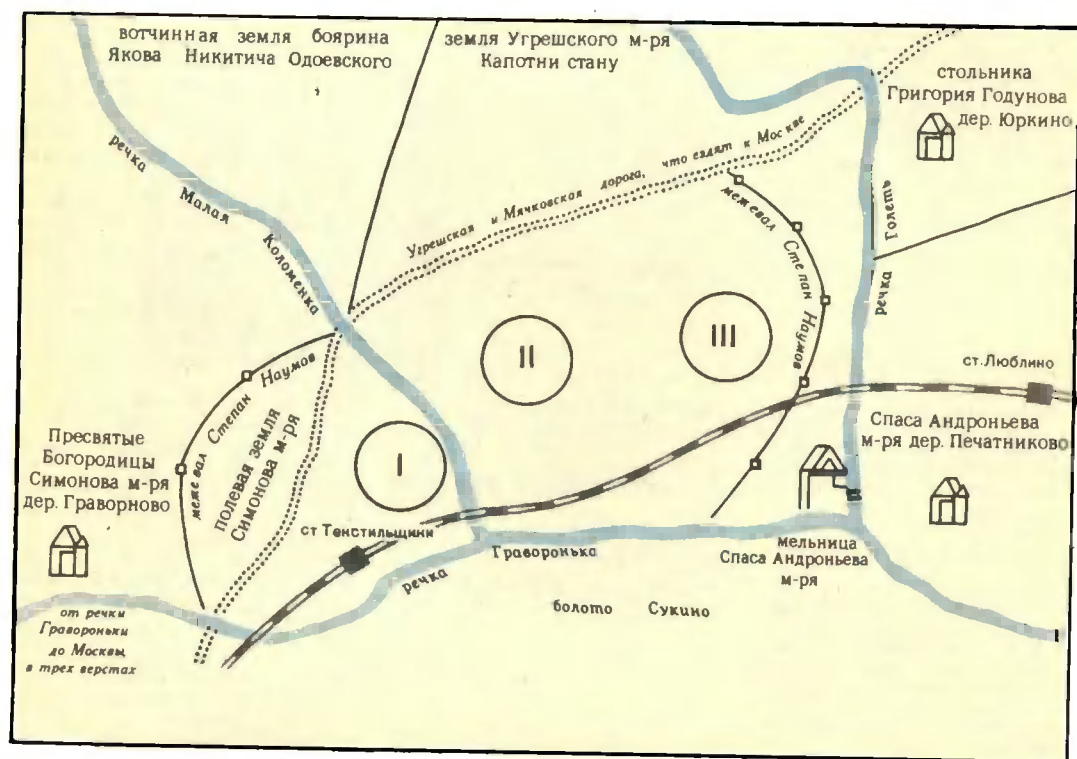
Документы XVIII столетия говорят о существовании выгонных земель между Тверской и Дмитровской дорогами — на территории, изображенной в правой части нашего чертежа. Возможно, что чертеж составлен для изъятия земель Петровского монастыря и Тверской ямской слободы под московский городской выгон.

Если о причине составления первого чертежа можно говорить лишь предположительно, то рождение второго несомненно обязано спору о землевладении. Этот чертеж также хранится в Центральном государственном архиве древних актов, но в фонде Поместного приказа и без названия. Как и первый, он выполнен пером и чернилами, но в графическом отношении несколько слабее. Поэтому я привожу фрагмент этого чертежа (в оригинале его размеры 44×66 см), а рядом его реконструкцию. На ней отображена часть левобережья речки Гравороньки с притоками Малой Коломенкой и Голетью.

¹ Соборное Уложение 1649 года. М., 1961, с. 444.



Фрагмент и реконструкция чертежа по речке Гвароронья, сделанного в XVII в. Кроме воспроизведенных на реконструированном чертеже, в оригинале имеются надписи: I — пустошь Гавшино Большого Успенского собору на ней построено; II — пустошь Кулятино Спаса Андроньева м-ря; III — пустошь Погорелка Спаса Андроньева м-ря. Для привязки к современной территории Москвы показан участок Московско-Курской железной дороги со станциями Текстильщики и Люблино.



Для облегчения «привязки» чертежа к современной территории города я нанес на свой рисунок схему Московско-Курской железной дороги со станциями Текстильщики и Люблино.

Среди большого числа надписей, сделанных на чертеже, я нашел только один топоним, сохранившийся на современной карте Москвы. В северо-западном углу чертежа (он ориентирован, как и большинство древнерусских чертежей, на восток) изображена деревня Граворново Симонова монастыря. Сейчас примерно здесь располагается Гравороновская улица. Старые москвичи еще должны помнить Сукино болото и деревню Печатниково, несколько выше которой в XIX столетии возникло селцо Люблино. В 1859 г., по данным Центрального статистического комитета², в Люблино была всего одна усадьба, занимаемая только летом, а в Печатниково «при речке Голедянке» (Голети в XVII в.) было 44 двора, в Граворново 22.

В отличие от первого чертежа, причину и дату составле-

ния второго удалось выяснить. Его можно назвать «Чертеж спорных земель по речке Гравороньке», он составлен в 1682 г. Семеном Муромцевым по распоряжению царей Иоанна и Петра Алексеевичей.

Многим москвичам и любителям истории города знаком замечательный памятник древнерусской архитектуры — палаты Аверкия Кириллова на Берсеневской набережной. Именно «благодаря» Аверкию, его многолетней тяжбе с властями Успенского собора Кремля и появилось это картографическое изображение. Там, где ныне размещается Дворец спорта Автозавода им. Ленинского комсомола, на чертеже изображена пустошь Гавшино Большого Успенского собора. Почему-то именно о пустоши Гавшино с пашней гектар на 25 в начале 1670-х годов подавали прошение многие лица. В 1677 г. молодой царь Федор Алексеевич пожаловал эту землю думному дьяку Аверкию Кириллову по его челобитной, в которой Гавшино названо «пустошью Карсаково или Карсаковы Горы тож».

Согласно «Уложению 1649 года», каждому думному дьяку полагалось подмосковное поместье в 75 десятин (около 82 га). Очевидно, используя свое высокое служебное положение, Аверкий с помощью Степана

Наумова, будущего царского стража опального патриарха Никона в Ферапонтовом монастыре, отмежевал себе «в подмосковное поместье» чуть ли не половину современного Люблинского района, прихватив земли Андроньева и Симонова монастырей — пустоши Кулятино и Погорелку. Присвоение земель и возведение в Гавшино «хорошего строения» привело к многолетней тяжбе. Больше 300 листов делопроизводства — челобитные, списки с царских грамот, акты досмотра и расспросов десятков «окольных людей» и, наконец, настоящий чертеж 1682 г. «учиненный» Семеном Муромцевым, посвящены этому делу³.

Чертеж составлялся в сентябре, а в июне Аверкий Кириллов был убит мятежными стрельцами. В 1683 г. был оглашен указ Иоанна и Петра Алексеевичей: «Дачю Кириллова и межевание Наумова отставить, и строенье отдать для того, что он Аверкий бил челом о той земле ложно, назвав порозжею землею». Пустошь Гавшино была возвращена Успенскому собору.

² Списки населенных мест Российской Империи, составленные и издаваемые Центральным статистическим комитетом. Вып. 24. Московская губ. СПб, 1862, с. 264.

³ Центральный государственный архив древних актов. Ф. 1209, столбцы, Москва, 324/32773.

В номере использованы фотографии АЛЕКСЕЕВА Н. Н., ГИППЕНРЕЙТЕРА В. Е., ДЮРГЕРОВА М. Б., ЖИВОТЧЕНКО В. И., ЛЮБИНСКОГО Е. Г. САПОЖНИКОВА Г. Н.

Художник П. Г. АБЕЛИН
Художественные редакторы
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР
Корректоры
Э. А. ГЕОРГАДЗЕ, Т. Д. МИРЛИС

Адрес редакции:
117049, Москва, ГСП-1,
Мароховский пер., 26.
Тел. 238-24-56, 238-26-33

Сдано в набор 29.11.84
Подписано к печати 10.01.85
Т—05004
Формат 70×100 1/16
Офсет
Усл.-печ. л. 10,32
Усл. кр.-отт. 1439,4 тыс.
Уч.-изд. л. 15,3
Бум. л. 4
Тираж 53 770 экз. Зак. 3325

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
г. Чехов Московской области



— символ межправительственной программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (The Man and the Biosphere). Этим символом обозначены материалы, которые журнал «Природа» публикует в рамках участия в деятельности этой программы.

В следующем номере



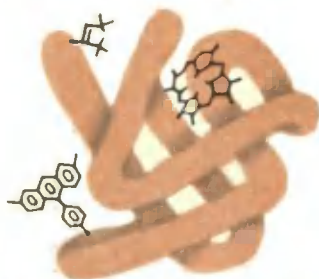
Все, что удалось узнать о диоксине, свидетельствует о его чрезвычайной опасности для человека. Это позволяет сформулировать основные проблемы, вставшие перед человечеством в связи с появлением этого коварного яда в природе.

Фокин А. В., Коломиец А. Ф. Диоксин — проблема научная или социальная?



Дружелюбное отношение собаки к человеку и острое чутье ее дикого сородича — шакала — можно, вероятно, совместить, скрестив этих животных. Гибриды с такими качествами очень ценны в поисковой службе.

Бехтин И. Н., Сулимов К. Т. Скрещивается собака с шакалом.



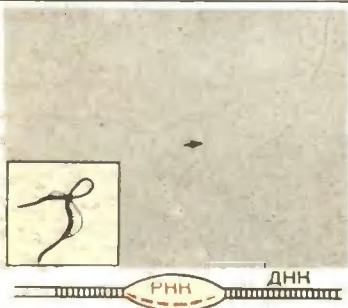
Соединение, обладающее яркими, легко обнаруживаемыми физическими свойствами, — физическая метка, встраивается в сложную биологическую систему: белок, мембрану или нуклеиновую кислоту — и позволяет расшифровать его структуру или исследовать движение составляющих его частей. В качестве таких меток биофизики используют парамагнетики, люминесцирующие хромофоры, электронно-плотные молекулы, мессбауэровские атомы.

Лихтенштейн Г. И. Физические метки в молекулярной биологии.



Понижение температуры на Земле около 5 и 2 млн лет назад привело к распространению в тропиках саванн — обширных открытых пространств. Эти коренные изменения природных условий стимулировали процессы антропогенеза — появление австралопитеков и первых представителей рода Номо.

Величко А. А. Природа у колыбели человечества.



Правильно ли рассматривать молекулярную биологию и ее важнейший раздел — генную инженерию — как науку, пошатнувшую устои биологии? При внимательном анализе всех сенсационных открытий оказывается, что надежда на особую, революционную роль генной инженерии в развитии биологии преждевременна.

Гречко В. В. Генная инженерия: революция в биологии?

Цена 80 к.
Индекс 70707

