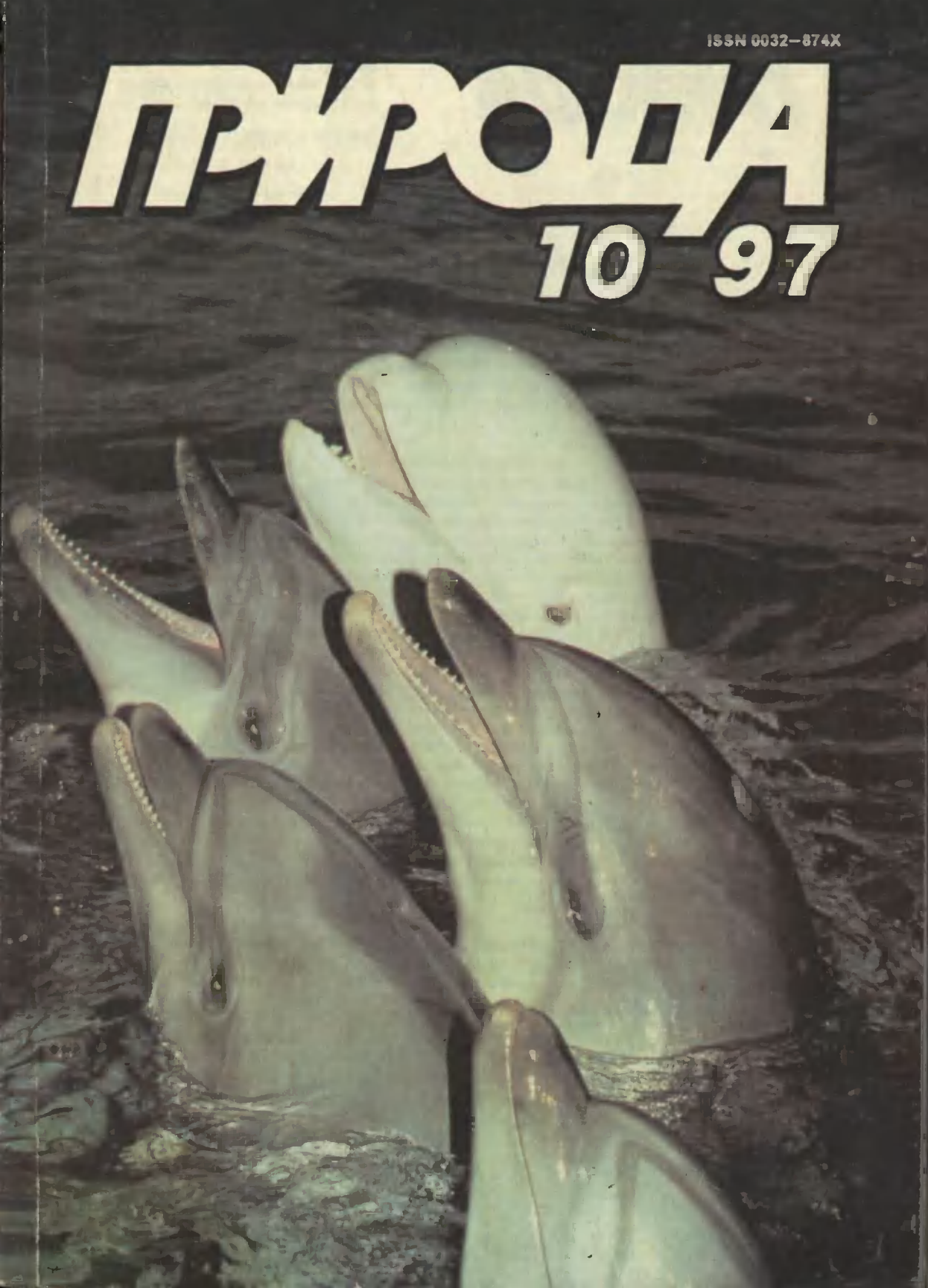
ISSN 0032–874X

ПРИРОДА

10 97



ПРИРОДА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Издается с января 1912 года

Главный редактор академик А.Ф.АНДРЕЕВ

Первый заместитель главного редактора А.В.БЯЛКО

Заместители главного редактора:
А.А.ГУРШТЕЙН (история естествознания),
А.А.КОМАР (физика),
А.К.СКВОРЦОВ (биология),
А.А.ЯРОШЕВСКИЙ (науки о Земле)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

И.Н.АРУТЮНЯН (редактор отдела физико-математических наук), О.О.АСТАХОВА (редактор отдела биологии и медицины), кандидат химических наук Л.П.БЕЛЯНОВА (редактор отдела экологии и химии), член-корреспондент РАН Н.А.БОГДАНОВ (геология), член-корреспондент РАН В.Б.БРАГИНСКИЙ (физика), член-корреспондент РАН А.Л.БЫЗОВ (физиология), доктор географических наук А.А.ВЕЛИЧКО (палеогеография), академик АМН А.И.ВОРОБЬЕВ (медицина), доктор биологических наук Н.Н.ВОРОНЦОВ (охрана природы), академик М.Е.ВИНОГРАДОВ (биоокеанология), член-корреспондент РАН С.С.ГЕРШТЕЙН (физика), член-корреспондент РАН Н.Ф.ГЛАЗОВСКИЙ (география), академик Г.С.ГОЛИЦЫН (физика атмосферы), кандидат физико-математических наук Ю.К.ДЖИКАЕВ (ответственный секретарь), академик Г.В.ДОБРОВОЛЬСКИЙ (почвоведение), академик В.А.ЖАРИКОВ (геология), академик Г.А.ЗАВАРЗИН (микробиология, экология), М.Ю.ЗУБРЕВА (редактор отдела географии и океанологии), академик В.Т.ИВАНОВ (биоорганическая химия), академик В.А.КАБАНОВ (общая и техническая химия), Г.В.КОРОТКЕВИЧ (редактор отдела научной информации), академик Н.П.ЛАВЕРОВ (геология), доктор биологических наук Б.М.МЕДНИКОВ (биология), Н.Д.МОРОЗОВА (научная информация), доктор геолого-минералогических наук Л.Л.ПЕРЧУК (геология), доктор технических наук Д.А.ПОСПЕЛОВ (информатика), член-корреспондент РАН В.А.СИДОРЕНКО (энергетика), академик В.Е.СОКОЛОВ (зоология), академик В.С.СТЕПИН (философия естествознания), академик В.Н.СТРАХОВ (геофизика), Н.В.УЛЬЯНОВА (редактор отдела геологии, геофизики и геохимии), Н.В.УСПЕНСКАЯ (редактор отдела философии, истории естествознания и публицистики), академик Л.Д.ФАДДЕЕВ (математика), член-корреспондент РАН М.А.ФЕДОНКИН (палеонтология), доктор биологических наук С.Э.ШНОЛЬ (биология, биофизика), О.И.ШУТОВА (редактор отдела охраны природы), член-корреспондент РАН А.М.ЧЕРЕПАЩУК (астрономия, астрофизика).

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Группа дельфинов в океанариуме. См. в номере: **Супин А.Я., Мосс А.М.** *Что видит и слышит дельфин.*

Фото В.Е.Шутова

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Карта северного полушария Венеры, составленная по результатам радарной съемки космического аппарата «Магеллан». Синим показаны низменности, коричневым — возвышенности. См. в номере: **Базилевский А.Т.** *Первая схема глобальной стратиграфии Венеры.*

Издательство «Наука» РАН

© Российская академия наук,
журнал «Природа», 1997

№ 10 (987) ОКТЯБРЬ 1997

В НОМЕРЕ

3 **Бялко А.В.**
ИТОГИ КОНКУРСА НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ РАБОТ

5 **Белоцерковский С.М.**
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ВИХРЕВАЯ АЭРОДИНАМИКА

Моделирование турбулентных течений на основе метода дискретных вихрей позволяет определить статистические характеристики струй и следов, в частности проследить формирование крупномасштабных когерентных структур и хаотизацию течения.

12 **Зайцев А.М.**
ЭКЗОТИЧЕСКИЕ МЕЗОНЫ

Современная теория сильных взаимодействий элементарных частиц допускает существование помимо обычных мезонов, состоящих из кварков и антикварков, экзотических, структура которых существенно иная. Ряд эмпирических фактов свидетельствует в пользу существования таких объектов.

21 **Базилевский А.Т.**
ПЕРВАЯ СХЕМА ГЛОБАЛЬНОЙ СТРАТИГРАФИИ ВЕНЕРЫ

Впервые созданная глобальная схема стратиграфии Венеры дает возможность реконструировать геологическую историю этой планеты.

27 **Островский А.А.**
ОТКРЫТИЕ НОВОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЯСА НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ

Тщательное изучение данных глубинного сейсмического зондирования позволило выявить неизвестную ранее тектоническую зону в центральной части Балтики.

39 **Москвин Л.Н.**
ХРОМАТОМЕМБРАННЫЙ МАССООБМЕННЫЙ ПРОЦЕСС. ИДЕЯ И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ВОПЛОЩЕНИЕ

Хроматомембранные методы не имеют видимых ограничений в разделении самых разнообразных веществ, а потому найдут применение в химических и медицинских технологиях, а также при мониторинге загрязнителей окружающей среды.

45 **Громов С.П.**
ФОТОПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Синтезирован новый тип фоточувствительных красителей. Из них и ионов металлов можно собирать сложные надмолекулярные структуры со свойствами фотопереключаемых устройств.

51 **Даванков В.А., Цюрупа М.П., Пастухов А.В., Маслова Л.А., Ильин М.М., Павлова Л.А., Андреева А.И., Тарабаева О.Г.**
СВЕРХСШИТЫЙ ПОЛИСТИРОЛ: ЧУЖОЙ СРЕДИ СВОИХ

Полистирол и его нерастворимые аналоги — едва ли не самые изученные полимерные материалы, и ожидать каких-либо новых свойств от них, казалось бы, нельзя. Однако стоит ввести между цепочками полистирола большое число жестких распорок, как он приобретает качества, неизвестные ни у одного из полимеров.

55 **Антонов А.С.**
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГРУПП НАЗЕМНЫХ РАСТЕНИЙ

С помощью методов молекулярной биологии построены филогенетические деревья, которые позволили по-новому осветить проблему происхождения семенных растений.

64 **Голубовская И.Н.**
МЕЙОЗ И ГЕНЫ

Путем создания и анализа двойных мейотических мутантов установлена последовательность действия генов мейоза — одного из двух основных типов деления клеток.

73 **Васильев Ю.М.**
КАК КЛЕТКА МЕНЯЕТ СВОЮ ОРГАНИЗАЦИЮ

В результате воздействия рассеивающего белка или при опухолевой трансформации эпителиоциты поляризуются и прорастают в окружающую соединительную ткань.

81 **Магазаник Л.Г.**
РЕГУЛЯЦИЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ОТ НЕЙРОНА К НЕЙРОНУ

Изучение механизмов управления синаптической передачей чрезвычайно важно для понимания регуляции функциональных связей между нейронами.

88 **Супин А.Я., Масс А.М.**
ЧТО ВИДИТ И СЛЫШИТ ДЕЛЬФИН?

Изучение особенностей зрения и слуха дельфинов позволило выяснить причины уникальности функционирования этих систем как под водой, так и на воздухе.

97 **Несис К.Н.**
ЖЕСТОКАЯ ЛЮБОВЬ КАЛЬМАРОВ

Никто не наблюдал спаривание глубоководных кальмаров, которое, судя по следам на теле самок, крайне жестоко: студенистое перерождение тканей и утрата щупальцев у самок в процессе полового созревания не позволяют им сопротивляться самцу.

104 НОВОСТИ НАУКИ **(50)**
КОРОТКО **(20, 26, 87)**

№ 10 (987) OCTOBER 1997

CONTENTS

3 **Byalko A.V.**
RESULTS OF THE CONTEST FOR POPULAR SCIENCE ARTICLES

5 **Belotserkovsky S.M.**
TURBULENCE AND VORTEX AERODYNAMICS

By modeling turbulent flows based on discrete vortices, it is possible to determine the statistical characteristics of streams and wakes, in particular, to trace how large-scale coherent structures form and how the flow acquires a chaotic character.

12 **Zaitsev A.M.**
EXOTIC MESONS

The modern theory of strong interactions between elementary particles assumes that, in addition to ordinary mesons consisting of quarks and antiquarks, there may also be exotic mesons with a substantially different structure — an assumption favored by some evidence.

21 **Basilevsky A.T.**
THE FIRST GLOBAL STRATIGRAPHIC SCHEME OF VENUS

A global scheme of Venus stratigraphy has been created for the first time, enabling the geological history of this planet to be reconstructed.

27 **Ostrovsky A.A.**
A NEW TECTONIC BELT IN THE BALTIC SHIELD

A careful study of deep seismic sounding data has revealed a previously unknown tectonic zone in the central part of the Baltic region.

39 **Moskvin L.N.**
CHROMATOMEMBRANE MASS EXCHANGE: THE IDEA AND ITS IMPLEMENTATION

Chromatomembrane methods show no apparent limitations in their ability to separate a wide variety of substances and are, therefore, useful in chemical and medical technologies, as well as in monitoring environmental contaminants.

45 **Gromov S.P.**
PHOTOSWITCHING MOLECULAR DEVICES

A new type of photosensitive pigment has been synthesized. Coupled with metal ions, such pigments can be used to construct complex permolecular structures with photoswitching properties.

51 **Davankov V.A., Tsyurupa M.P., Pastukhov A.V., Maslova L.A., Il'in M.M., Pavlova L.A., Andreeva A.I., and Tarabaeva O.G.**
HYPERCROSSLINKED POLYSTYRENE: AN ALIEN WITHIN ITS OWN CLASS

Polystyrene and its insoluble analogs are among the best studied polymer materials and as such could hardly be expected to yield any new properties. Yet by inserting a large number of rigid braces between polystyrene chains, it is possible to obtain qualities no known polymer has exhibited before.

55 **Antonov A.S.**
ORIGIN OF THE MAIN GROUPS OF TERRESTRIAL PLANTS

Research on the nucleotide sequences of sections of chloroplast DNA from several dozen plant species has been used to construct phylogenetic trees, providing new insights into the origin of seed plants.

64 **Golubovskaya I.N.**
MEIOSIS AND GENES

By synthesizing and analyzing double mei-mutants, it has been possible to determine the order of gene action during meiosis — one of the two principal types of cell division.

73 **Vasilyev Yu.M.**
HOW A CELL REORGANIZES ITSELF

Owing either to the scatter factor or to tumor transformation, epitheliocytes become polarized and penetrate the surrounding connective tissue.

81 **Magazanik L.G.**
REGULATION OF NEURON-TO-NEURON SIGNAL TRANSMISSION

Investigating the mechanisms for controlling synaptic transmission is extremely important for understanding how functional relationships between neurons are regulated.

88 **Supin A.Ya. and Mass A.M.**
WHAT THE DOLPHIN SEES AND HEARS

Research on dolphins' sight and hearing has clarified why these systems function in a unique fashion both underwater and in the air.

97 **Nesis K.N.**
CRUEL LOVE AMONG SQUIDS

No one has ever observed the mating of squids, which — judging by the marks left on the females — must be a very cruel ritual. During puberty, the females have their tissues degenerate into a jelly-like mass and lose their tentacles, making them unable to resists the males.

104 SCIENCE NEWS **(50)**
IN BRIEF **(20, 26, 87)**

ИТОГИ КОНКУРСА НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ РАБОТ

В НАУКЕ царского пути нет — так, согласно преданию, сказал Аристотель своему ученику Александру Македонскому. Сегодня путей в науке стало два: засекреченные прикладные исследования и открытые публикации в специальных журналах. И есть соответственно два способа суждения общества о результатах научных работ: в первом случае показателем успеха служит сам продукт, продаваемый или принимаемый на вооружение, во втором — научно-популярное изложение, доступное широкой общественности.

В апреле 1996 г. Международный научный фонд (МНФ), созданный на пожертвования Дж.Сороса, объявил конкурс среди держателей грантов на подготовку научно-популярной статьи по результатам двухлетних исследований. По условиям конкурса эти статьи должны одновременно описывать текущую ситуацию в конкретном научном направлении и собственные результаты. Присуждались три премии в каждом из пятнадцати научных направлений, победители премировались тысячей долларов.

Свои научно-популярные статьи представили 307 ответственных исполнителей. По некоторым разделам в конкурсе участвовали до 11 статей, в результате чего отбор оказался достаточно строгим. Ряд работ, не получивших премий, также написан на достаточно высоком уровне. Большинство из них составили портфель редакций научно-популярных журналов, в частности, «Природа» опубликовала уже около десятка таких работ.

Наш журнал готовил к печати и сборник «Российская наука: выстоять и возродиться», выпущенный издательством «Наука-Физматлит», куда вошли премированные статьи. Публикация сборника финансировалась не только МНФ, но и Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ). Презентация этой книги состоялась 20 июля, в ней приняли участие Дж.Сорос, председатель жюри конкурса академик В.П.Скулачев, бывший министр науки РФ Б.Г.Салтыков и большинство лауреатов. К сожалению, из-за болезни отсутствовал инициатор этого конкурса академик Л.Б.Окунь, сопредседатель консультативно-наблюдательного совета МНФ.

На презентации книги академик Скулачев сказал: «Одна из язв нашего времени — нарастание знахарства, антинауки, процесс, который всегда сопутствует кризисам в обществе. Мы за то, чтобы не только делать открытия, но и за то, чтобы наука имела в глазах простых людей адекватный образ, благородный, просветительный».

На презентации сборника «Российская наука: выстоять и возродиться». Слева направо: Дж.Сорос, В.П.Скулачев, Б.Г.Салтыков, А.В.Бялко.

Фото Г.В.Короткевич

Конкурс среди держателей грантов не имел прецедентов, но «первый блин» не вышел комом. Все же уместно отметить ряд недостатков в его организации. На проведение конкурса было отведено слишком короткое время, в итоге лишь малая доля участников сумела подготовить качественные научно-популярные статьи. Наверное, объявление о конкурсе следует давать не после завершения основного гранта, но еще в процессе его выполнения: изложение проблемы для широкой общественности способствует самому научному творчеству. Предельный объем статей (10 страниц) для крупных тем, возможно, несколько занижен (впрочем, некоторые авторы компенсировали это требование сжатием распечатки).

Сейчас обсуждается идея продолжить начинание МНФ и провести конкурс научно-популярных работ также среди держателей грантов РФФИ. Конкурсные комиссии по научным направлениям разумно формировать с участием победителей конкурса МНФ, используя тот большой опыт, который они приобрели при подготовке своих работ к публикации.

В этом номере «Природы» мы публикуем несколько премированных статей, в которых представлены темы, еще не затронутые или редко освещаемые журналом.

Заместитель главного редактора,
доктор физико-математических наук
А.В.Бялко

Турбулентность и вихревая аэродинамика

С. М. Белоцерковский

Сергей Михайлович Белоцерковский, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Центрального института им.Н.Е.Жуковского. Лауреат Государственных премий СССР (1975, 1981), премии Н.Е.Жуковского (1967), премии Совета Министров (1981).

ТЕЧЕНИЯ жидких и газообразных сред бывают двух типов: 1) спокойные, плавные и 2) нерегулярные, со значительным перемешиванием объемов среды и хаотическим изменением скоростей и других параметров. Первые называют ламинарными, а для вторых английский физик У.Томсон предложил термин «турбулентные» (от английского слова turbulent — бурный, беспорядочный). Большинство течений в природе и технике относятся именно ко второй, наименее изученной группе. В этом случае применяют статистические (связанные с осреднением по времени и пространству) способы описания. Во-первых, потому, что практически невозможно уследить за пульсациями в каждой точке течения, а во-вторых, эти данные бесполезны: их нельзя использовать в конкретных приложениях.

Поскольку турбулентность — одно из глубочайших явлений природы, при самом общем подходе к его изучению оно смыкается с философским проникновением в суть вещей. Знаменитый ученый Т.Карман очень образно охарактеризовал это, сказав, что, когда предстанет перед Создателем, первое откровение, о котором будет просить, — раскрыть тайны турбулентности.

Наибольший практический интерес представляют такие течения, которые соответствуют весьма большим числам Рейнольдса $\mathrm{Re} = u_0 b/\nu$. В эту безразмерную величину входят основная скорость u_0 (в струе — скорость истечения, для самолета — скорость полета), характерный линейный размер b (диаметр сопла или хорда крыла) и

© С.М.Белоцерковский

коэффициент вязкости среды ν. Число Рейнольдса определяет соотношение инерционных сил и сил трения (вязкости). Типичные значения этого числа в авиации таковы: $Re = 10^5—10^7$.

ЧТО ТАКОЕ ВИХРЕВАЯ АЭРОДИНАМИКА?

Вихревые течения воды и воздуха известны нам с детства. Ставя запруды в ручьях, мы могли наблюдать, как, обтекая края, вода интенсивно вращается, образуя водовороты. Когда вода вытекает из ванны, появляется жидкая воронка с вращением. За летящим самолетом можно отчетливо видеть два устойчивых следа: это с концов крыла сходят вихревые жгуты, которые тянутся на много километров. Вихревые течения представляют собой вращающиеся объемы среды — воды, воздуха и т.д. Если сюда поместить маленькую крыльчатку, она также станет вращаться.

Простейший математический образ, описывающий чисто вращательное движение жидкости, — тонкая прямолинейная нить бесконечной длины. Из соображений симметрии ясно, что во всех плоскостях, перпендикулярных нити, картина скоростей одинакова (плоскопараллельное течение). Кроме того, на любой окружности радиуса r с центром на нити скорость v будет направлена по касательной к окружности и постоянна по величине.

Интенсивность вихря принято характеризовать циркуляцией скорости по замкнутому контуру, охватывающему вихрь. В данном случае на окружности радиуса r циркуляция равна $\Gamma = 2\pi rv$. Согласно теореме о постоянстве циркуляции, справедливой для идеальной (лишенной трения) среды, Γ не зависит от r. В результате получаем частный вид формулы Био—Савара

$$v = \Gamma/2\pi r. \qquad (1)$$

Как видно из уравнения (1), по мере приближения к оси вихря (т. е. при $r \to 0$) скорость неограниченно возрастает ($v \to \infty$) как $1/r$. Такую особенность принято называть сингулярной.

17 января 1997 г. исполнилось 150 лет со дня рождения Н.Е.Жуковского, «отца русской авиации». Он заложил теоретическую базу современной аэродинамики, сделав ее основой авиации: установил механизм образования подъемной силы крыла в идеальной жидкости, ввел понятие присоединенных (неподвижных относительно крыла) вихрей, стал родоначальником так называемого вихревого метода. Согласно этому методу, крыло или летательный аппарат (ЛА) заменяют системой присоединенных вихрей, которые в силу теоремы о сохранении циркуляции порождают свободные (несущие) вихри, движущиеся вместе с жидкой средой. При этом задача сводится к определению интенсивности всех вихрей и положения свободных вихрей. Вихревой метод оказался особенно эффективным с появлением компьютеров и созданием численного метода дискретных вихрей (МДВ)[1].

ВИХРЕВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СЛЕДОВ И СТРУЙ

За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в изучении фундаментальных проблем турбулентности, чем мы обязаны прежде всего А.Н.Колмогорову и А.М.Обухову, их ученикам и последователям, а также их предшественникам Л.Ричардсону и Д.Тейлору.

При больших числах Re общепринятым стало понимание турбулентности как иерархии вихрей разных размеров, когда имеют место пульсации скорости потока от больших до самых малых значений. Крупномасштабная турбулентность определяется формой обтекаемого тела или конфигурацией сопла, откуда вытекает струя, режи-

[1] Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание крыльев идеальной жидкостью. М., 1978.

мом истечения, состоянием внешней среды. Здесь силы вязкости при формировании следов и струй можно не учитывать. При описании мелкомасштабных турбулентных течений на определенном этапе следует вводить в рассмотрение механизм молекулярной вязкости. Согласно теории Колмогорова—Обухова, локальное строение мелкомасштабной развитой турбулентности в значительной степени описывается универсальными закономерностями. Доказано, что в области достаточно малых масштабов должен преобладать статистический универсальный режим, практически стационарный и однородный.

Обосновано также существование некоторого промежуточного режима турбулентности — инерционного, возникающего на масштабах, малых по сравнению с характерным размером течения в целом, но больших, чем тот микромасштаб, где уже существенны явления вязкости. Таким образом, в этом интервале, как и в начальной стадии турбулентности, вязкость среды можно не учитывать. Однако общая теория турбулентности, которая содержала бы не только качественное описание основных процессов, но и количественные соотношения, позволяющие определять турбулентные характеристики, еще не создана. Построение строгой в математическом смысле теории затруднено еще и тем, что едва ли возможно дать исчерпывающее определение самой турбулентности.

В то же время на вопросы, возникающие в связи с разнообразными техническими приложениями, требовались оперативные ответы — хотя бы и приближенные, но научно обоснованные. В результате стала интенсивно развиваться так называемая полуэмпирическая теория турбулентности, в которой наряду с теоретическими закономерностями и расчетами используются экспериментальные данные. Вклад в становление этого направления внесли такие ученые, как Д.Тейлор, Л.Прандль и Т.Карман. Развитию и внедрению в практику этих подходов содействовали Г.Н.Абрамович, А.С.Гиневский[2] и др.

В полуэмпирической теории турбулентности проблема рассматривается упрощенно, поскольку изучаются не все статистические характеристики, а только самые важные для практики — в первую очередь средние скорости и средние значения квадратов и произведений пульсационных скоростей (так называемые моменты 1-го и 2-го порядков). Недостаток такого подхода прежде всего в том, что надо из эксперимента получить целый ряд данных для каждой группы конкретных условий: для тел разной формы при изучении следов, для различных конфигураций сопл, из которых истекают струи, и т. д. Кроме того, эта теория основана на стационарных подходах (развитие процесса во времени не рассматривается), что сужает ее возможности.

Развиваемая нами вихревая компьютерная концепция турбулентных следов и струй представляет собой замкнутую конструктивную математическую модель (ММ). Она построена с использованием всех достижений вихревой аэродинамики, обусловленных применением МДВ, для реализации тех современных представлений о турбулентности, о которых шла речь выше[3]. Построение ММ ведется для больших чисел Рейнольдса и базируется на трактовке свободной турбулентности как иерархии вихрей разного масштаба. При этом турбулентное движение рассматривается в общем случае как трехмерное и нестационарное.

Практическая реализация моделирования нестационарных струйных течений осуществляется методом дискретных вихрей. При этом непрерывная по пространству и времени модель заменяется ее дискретным анало-

---

[2] Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. М., 1984; Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. М., 1969.

[3] Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентности струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М., 1995.

гом. Дискретизация по времени состоит в том, что процесс полагается изменяющимся скачкообразно в моменты времени $t_n = n\Delta t$ ($n = 1, 2, \ldots$). Дискретизация по пространству заключается в замене непрерывных вихревых слоев гидродинамически замкнутыми системами вихревых элементов (вихревых нитей или рамок). Важен также учет в ММ того обстоятельства, что свободные вихри движутся со скоростями жидких частиц, причем их число со временем возрастает.

Указанный подход к моделированию течений позволяет без привлечения дополнительной эмпирической информации исследовать общий характер развития процесса во времени. ММ, созданные на базе МДВ, описывают все главные черты развития турбулентных следов, струй и отрывных течений, включая переход от детерминированных процессов к хаосу. Они позволяют также рассчитывать статистические характеристики турбулентности (моменты 1-го и 2-го порядков).

Главное внимание мы уделяли компьютерному расчету обтекания тел, построению ближних участков следов и струй. Большой материал, накопленный нами в этой области, включает не только прямые сопоставления расчета с экспериментом, но и проверку ММ на выполнение универсальных законов Колмогорова—Обухова развитой турбулентности, которые, таким образом, играют роль независимых тестов[4]. Численный эксперимент в сочетании с физическим и комплексный анализ результатов привели нас к следующим выводам.

Основные черты и макроэффекты отрывного обтекания тел при больших числах Рейнольдса, в том числе ближний след и струи с их характеристиками, в случае известных мест отрыва потока (на острых кромках, изломах, срезах тел и т.д.) не зависят от вязкости среды; они определяются инерционным взаимодействием в жидкостях и газах, которые описывают нестационарные уравнения идеальной среды. Дальнейший анализ показал, что в ряде задач необходимо учитывать и вязкие отрывы, особенно на поверхности гладких тел (таких, как круговые и эллиптические цилиндры). Поэтому следующий шаг в развитии данной концепции состоял в том, что нестационарные модели идеальной среды были дополнены нестационарными уравнениями пограничного слоя для определения места отрыва[5].

Таким образом, была обоснована и осуществлена смена приоритетов: на первый план вышла не вязкость среды, а нестационарные явления.

Основополагающая работа Жуковского «О присоединенных вихрях» была опубликована в 1906 г. Современность выдвинула новые проблемы, а компьютерные технологии расширили области применимости теоретических методов. Классические идеи Жуковского переживают ныне вторую молодость, открывая новые возможности теории идеальной среды и вихревых методов.

Важно подчеркнуть, что в природе вихревые течения и хаос живут бок о бок, становясь прародителями турбулентности. Вращение жидких объемов порождает неустойчивость, а также появление и распад регулярных структур, что ведет к образованию новых вихрей и развитию хаоса.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 и 2 приведены примеры когерентных вихревых структур, полученных расчетным путем на компьютерах. Так назвали крупномасштабные, в той или иной степени упорядоченные вихревые структуры, образующиеся в вихревых следах и струях. В последние годы им стали уделять большое внимание, установив, что они играют существенную роль в явлениях турбулентности.

[4] Belotserkovsky S.M. // Ann. Rev. Fluid Mech. 1977. V.9. P.469—494.

[5] Belotserkovsky S.M., Kotovskii V.N., Nisht M.I., Fedorov R.M. Two-dimensional separated flows. Boca Raton, 1994.

Рис. 1.

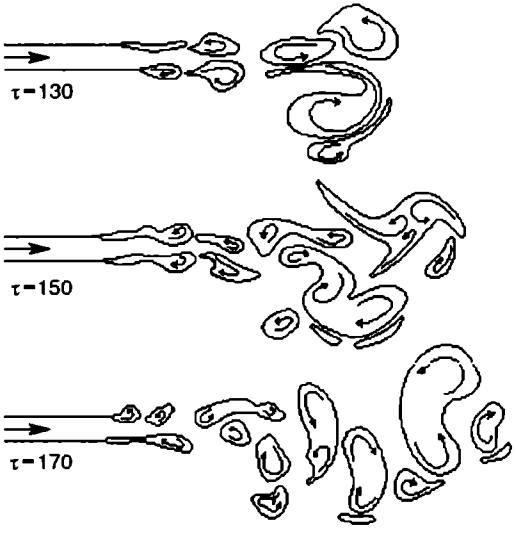


Рис. 2.

Рис. 3.

Одной из классических является задача об отрывном обтекании пластины, поставленной перпендикулярно набегающему потоку. Если угодно, это — модель обтекания запруды, установленной поперек ручья. Еще в начале столетия Карман, постулируя наличие вихревой дорожки с шахматным расположением точечных дискретных вихрей, нашел соотношение между шириной дорожки h и продольным расстоянием между вихрями l:

$$h / l = 0.28. \qquad (2)$$

Однако в 30-х годах в работах Н.Е.Кочина, В.В.Голубева и др. было показано, что вывод этого уравнения по теории возмущений (в предположении устойчивости дорожки) некорректен. Оказалось, что устойчивость сохраняется лишь при частном виде возмущений. В то же время эксперименты подтверждали соотношение (2).

Только в 70-х годах нам удалось разгадать этот парадокс. Допуская сход свободных вихрей с кромок пластин (иначе скорости обращаются здесь в бесконечность) и решая нестационарную отрывную задачу с помощью МДВ, мы пришли к картине, изображенной на рис.1. При этом объемные вихревые сгустки хотя и деформируются, но расстояния между их центрами соответствуют формуле (2).

На рис.2 изображены мгновенные картины крупномасштабных вихревых образований в плоской турбулентной струе, истекающей с начальной скоростью u_0 из канала ширины $2r$. Безразмерное время τ введено по формуле $\tau = u_0 t/r$. Каждая из замкнутых кривых соответствует сгустку завихренностей одного знака (или с явным преобладанием вихрей одного направления вращения). С помощью МДВ процесс моделировался от начала истечения ($\tau = 0$). Границы струи заменялись дискретными вихрями, которые теряли устойчивость и наряду со средней регулярной скоростью приобретали флуктуации.

Одной из ответственных проверок построенной ММ стала задача об истечении струи из круглого сопла. Оказалось, что осесимметричная схема недостаточна (турбулентные течения не терпят искусственных ограничений). Зато пространственная нестационарная ММ привела к полному успеху. Рис.3 показывает, как трансформируется

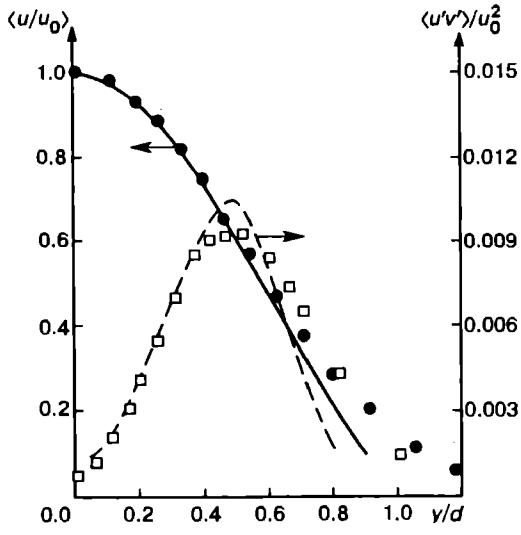
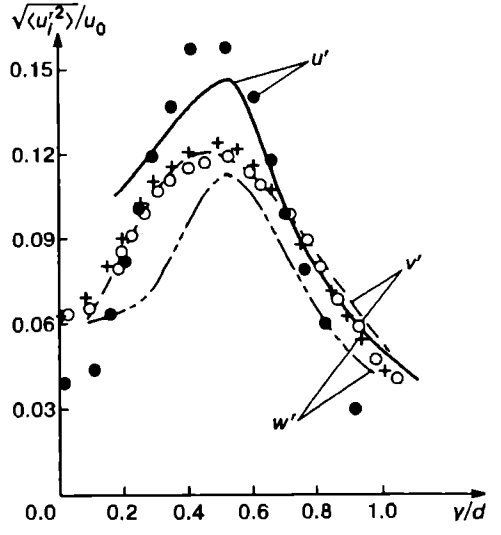


Рис. 4.



вихревая граница струи. Начальный участок сохраняет осевую симметрию; затем она разрушается, но просматривается тенденция к формированию когерентных структур.

На рис.4 сопоставляются результаты расчета (линии) и эксперимента (символы) в сечении $x/d = 4$, где d — диаметр сопла, для средних пульсаций скоростей истечения $(\langle u_i'^2\rangle)^{1/2}/u_0$ (здесь $u'_1 = u'$, $u'_2 = v'$, $u'_3 = w'$) и рейнольдсовых напряжений сдвига $\langle u'v'\rangle/u_0^2$.

ВИХРЕВАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

Результатом наших многолетних исследований стало развитие вихревой компьютерной концепции турбулентности. Впервые была создана и многократно опробована замкнутая ММ турбулентных следов и струй, в которой не требуется прибегать к экспериментальным данным. На повестке дня — систематическое использование созданного аппарата в поисковых и прикладных исследованиях.

Остановимся подробнее на одной области приложений, которая уже приобретает реальную жизнь, — на проблеме вихревой безопасности полетов. Образование аэродинамической подъемной силы всегда сопровождается возникновением и сходом в поток свободных вихрей. Они превращаются в устойчивые вихревые жгуты, которые тянутся за тяжелыми самолетами 10—15 км (рис.5). По сути дела это еще один тип когерентных вихревых структур, очень мощных и опасных: попадание в них других ЛА чревато аварией или даже катастрофой.

Впервые с этой проблемой мне довелось столкнуться в 1968 г., в комиссии по расследованию обстоятельств гибели Юрия Гагарина[6]. Он совершал тренировочный полет на самолете-спарке УТИ МИГ-15 вместе с инструктором В.Серегиным, опытным боевым летчиком. Было доказано, что самолет вышел на закритический режим и попал в «штопор» (неуправляемое вращение). Учитывая надежность самолета, главное внимание и горячие дискуссии вызвал вопрос, что могло стать причиной этого. В конце концов всесторонний анализ с привлечением методов моделирования на ЭВМ привел нас к заключению: причиной было неожиданное сближение с другим самолетом и резкий маневр на уклонение с возможным попаданием в вихревой след самолета, летящего впереди. С тех пор я «заболел»

[6] Белоцерковский С.М. Первопроходцы Вселенной. М., 1997.

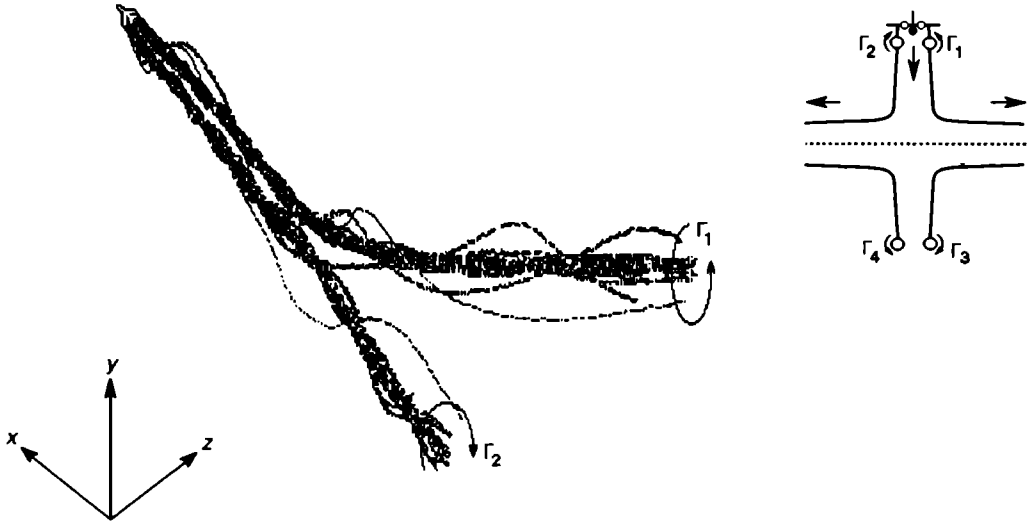


Рис. 5.

проблемой вихревой безопасности полетов, а нашей исследовательской группой непрерывно совершенствовался математический аппарат для анализа таких явлений.

На рис.5 изображено положение двух жгутов, в которые собираются свободные вихри самолета. Вначале, при полете на значительной высоте, они движутся параллельно и из-за взаимодействия с соседними вихрями опускаются. У земли, поверхность которой препятствует дальнейшему снижению, начинается разбегание жгутов в стороны. Причину этого легко понять: на поверхности земли не может быть вертикальных скоростей. Это «условие непротекания» можно обеспечить введением фиктивных зеркально отраженных вихрей, которые, кроме того, создают боковые скорости, ведущие к разбеганию жгутов.

Сказанное объясняет причины другой катастрофы, которая произошла в Ташкенте в 1987 г. при поочередном взлете самолетов Ил-76 и Як-40. Все требования инструкции были выполнены, но второй самолет попал в след первого, начал резко крениться и врезался в землю: эффективности элеронов не хватило. Анализ ситуации и моделирование дали следующий результат. На аэродроме при хорошей погоде дул небольшой ветер 0.5—1.0 м/с. Из-за этого один из вихревых жгутов завис над взлетной полосой, и Як-40 на расстоянии 6—7 км попал в него. Такая небольшая величина бокового ветра оказалась критической. В дальнейшем это обстоятельство нашло отражение в инструкции.

В конце 1991 г. в Вашингтоне состоялся международный симпозиум по вихревой безопасности, на котором мне довелось выступить с двумя докладами. С тех пор у нас идут регулярные общения и совместные исследования со специалистами Канады и США. Так, в 1996 г. мы рассматривали в Вашингтоне следующую крупную авиационную катастрофу. Самолет «Боинг-737», совершая рейсовый полет, попал в вихревой след идущего впереди на расстоянии 7.8 км «Боинга-727». В результате потери управляемости второй самолет потерпел катастрофу, в которой погибло 132 человека.

Рост авиационных перевозок, напряженный ритм работы международных аэропортов делает проблему вихревой безопасности особо важной.

Экзотические мезоны

А. М. Зайцев

Александр Михайлович Зайцев, доктор физико-математических наук, профессор, начальник отдела Института физики высоких энергий (Протвино). Автор свыше 150 публикаций. Основные работы посвящены экспериментальному исследованию легких мезонов и экспериментальным методам физики высоких энергий.

Основными задачами физики высоких энергий принято считать поиск и исследование фундаментальных объектов и взаимодействий между ними, нахождение законов, описывающих их свойства.

Одним из замечательных достижений в этой области является квантовая электродинамика (КЭД). В качестве фундаментальных объектов в этой науке рассматриваются точечные заряженные частицы со спином 1/2 — электроны и позитроны — и не имеющие заряда безмассовые частицы со спином 1 — фотоны. КЭД позволяет определять характеристики различных электромагнитных процессов с очень высокой точностью. Помимо электромагнитных существуют также гравитационные взаимодействия, сильные, слабые и, возможно, какие-то еще[1]. Благодаря сильным взаимодействиям протоны и нейтроны удерживаются в ядрах, проявлением слабого взаимодействия является, например, β-распад какого-либо ядра. В 70-е годы стало ясно, что сильные и слабые взаимодействия во многом аналогичны электромагнитным. Так, основными объектами теории сильных взаимодействий являются частицы со спином 1/2 — кварки, их античастицы — антикварки и безмассовые частицы со спином 1 — глюоны. Главное отличие этой теории, называемой квантовой хромодинамикой (КХД), от КЭД — положение о том, что сами переносчики взаимодействия, глюоны, обладают зарядом (он называется цветовым) и могут излучать. Это обстоятельство приводит к тому, что в КХД наряду со связанными состояния-

© А.М.Зайцев

[1] Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М., 1984; Вайнберг С. Открытие субатомных частиц. М., 1986; Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. М., 1988.

ми из частиц с противоположными зарядами допускается существование состояний из одних только глюонов, называемых глюболами, и из кварк-антикварковых пар и глюонов — гибридов. Исследования подобных объектов позволяют понять важнейшие свойства сильных взаимодействий, не поддающиеся пока детальному описанию в КХД; они ведутся широким фронтом в ряде ускорительных лабораторий. В частности, в Институте физики высоких энергий на установке «Вершинный спектрометр» (ВЕС) проведен цикл экспериментов по поиску и исследованию гибридных мезонов, в котором обнаружены экзотические свойства некоторых мезонных состояний.

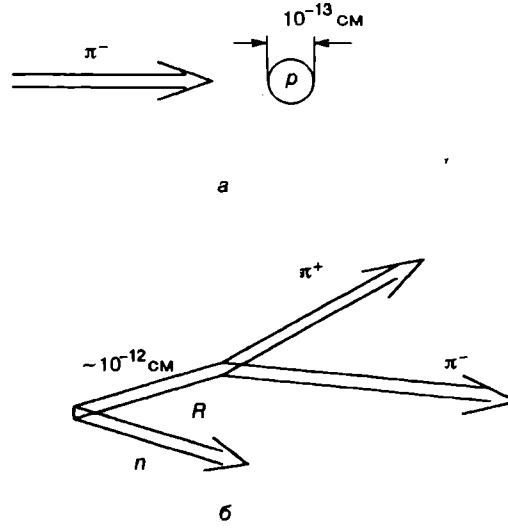


Рис.1. Образование и распад резонанса R во взаимодействиях π-мезона с протоном: а) картина перед взаимодействием; б) результат взаимодействия и распада резонанса.

КАК УСТРОЕНЫ МЕЗОНЫ

Мезоны — заряженные или нейтральные частицы, способные к сильному взаимодействию и имеющие целый спин. Обычно мезоны состоят из кварка и антикварка, но возможны и отмеченные выше состояния с примесью глюонов или только из них. Экзотическими называются мезоны, не состоящие из кварк-антикварковой пары. Мезоны обозначаются греческими или латинскими буквами с индексами, указывающими заряд и спин, а в скобках дается масса в МэВ/c^2, например $a_2^-(1320)$.

Известно несколько сотен мезонов с разными массами, временами жизни, вероятностями распадов по различным каналам. Все мезоны нестабильны, подавляющее большинство из них распадается за малое время $\approx 10^{-22}$ сек. Такие короткоживущие мезоны называют резонансами. Они образуются в различных реакциях с участием частиц высоких энергий. Рассмотрим для примера реакцию, изображенную на рис.1, в которой резонанс R рождается в $\pi^- p$ взаимодействиях и распадается на $\pi^+\pi^-$. Сам резонанс непосредственно не удается наблюдать в силу малого времени жизни и малого пробега до распада, но его свойства вполне поддаются детальному исследованию. Так, масса и ряд других характеристик могут быть найдены по углам разлета и энергиям продуктов распада. Мезоны, как и другие микрообъекты, описываются волновыми функциями. Конкретный вид волновой функции определяется набором дискретных величин, называемых квантовыми числами. Это спин мезона J — собственный момент количества движения, измеренный в единицах постоянной Планка $\hbar$, а также пространственная четность (P-четность) и в некоторых случаях — зарядовая четность (C-четность). P- и C-четности характеризуют то, как меняется волновая функция при инверсии координат и при замене частиц на античастицы. Квантовые числа отражают «внутреннее устройство» мезона. Исследование различных реакций и каналов распада позволяет определить квантовые числа мезонов, т.е. J, P и C. Обычно их обозначают J^{PC}. Оказывается, почти все наблюдаемые мезоны выглядят так, будто они состоят из пары кварк-антикварк. Особенно хорошо это видно на примере мезонов, построенных из $b\bar{b}$- или $c\bar{c}$-кварков. Перечислим возможные состояния сис-

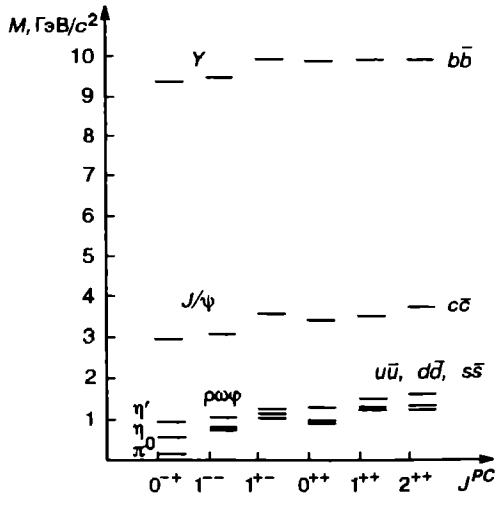


Рис.2. Массы и квантовые числа нейтральных мезонов. Для каждого состояния кварк—антикварк приведены только самые легкие мезоны.

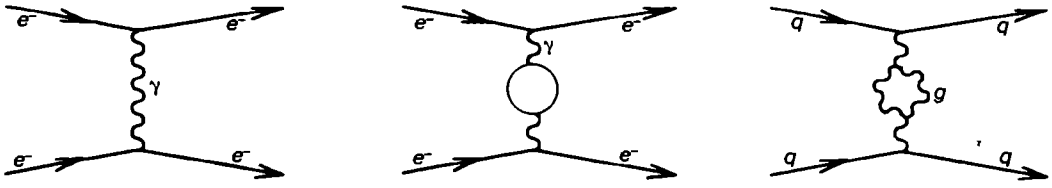
тем $b\bar{b}$ или $c\bar{c}$ и попытаемся оценить ожидаемые характеристики этих систем.

Каждый из кварков имеет спин $S=1/2$, так что суммарный спин $q\bar{q}$ может быть либо $S=0$, либо $S=1$. Кроме того, рассматриваемые вместе, парой, кварк и антикварк могут обладать орбитальным моментом $L = 0, 1, 2...$ Складывая произвольно ориентированные S и L по правилам квантовой механики, получаем следующие возможные состояния с полным моментом J:

$S=0$ $L=0$ $J=0$ $\quad J^{PC}=0^{-+}$
$S=0$ $L=1$ $J=1$ $\quad J^{PC}=1^{+-}$
$S=1$ $L=0$ $J=1$ $\quad J^{PC}=1^{--}$
$S=1$ $L=1$ $J=0, 1, 2$ $\quad J^{PC}=0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$.

Значения внутренней четности P и зарядовой четности C в квантовой механике для рассматриваемых систем однозначно определяются через L и S. Существуют и состояния с более высокими значениями L, которые различаются между собой угловой зависимостью волновой функции. Кроме того, при одних и тех же значениях L возможны состояния, имеющие различные зависимости волновой функции от расстояния между кварками. Соответствующие состояния называются радиальными возбуждениями. Именно таков экспериментально наблюдаемый спектр мезонов. На рис.2 приведены массы и квантовые числа ряда мезонов, состоящих из $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$, $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$. Аналогично выглядят и несимметричные системы типа $u\bar{d}$, $u\bar{s}$, $u\bar{b}$... В целом эта картина очень напоминает спектр состояний атома водорода, только масштаб энергий связи совершенно другой из-за того, что кварки тяжелее электронов и силы притяжения между ними больше. Однако эта относительно простая картина не исчерпывает всего многообразия явлений в спектрах мезонов. Хотелось бы понять, почему не наблюдаются свободные кварки и глюоны, чем вызваны особенности в спектрах легких мезонов, где бросается в глаза аномально малая масса π-мезона и аномально большая масса η'-мезона. Чтобы ответить на эти вопросы, вернемся к электродинамике.

Мы знаем, что по закону Кулона энергия взаимодействия двух зарядов убывает обратно пропорционально расстоянию. Диаграмма Фейнмана, иллюстрирующая такое взаимодействие, приведена на рис.3,*а*. В КЭД этот закон несколько видоизменяется из-за поправок, связанных с так называемыми вакуумными флуктуациями. Благодаря квантомеханическому соотношению неопределенностей в вакууме на небольшое время могут появляться электрон-позитронные пары; эти частицы называются виртуальными. Взаимодействие электромагнитного поля с такими флуктуациями приводит к частичной экранировке заряда, причем степень экранирования увеличивается с расстоянием. В результате этого эффективный электрический заряд уменьшается с расстоянием между взаимодействующими зарядами. Данное явление называется поляризацией вакуума, соответствующие диаграммы Фейнмана приведены на рис.3,*б*. Оно хорошо изучено экспериментально и теоретически.



а *б* *в*

Рис.3. Диаграммы, изображающие взаимодействия частиц: а) рассеяние двух заряженных частиц; б) поляризация вакуума (КЭД); в) поляризация вакуума вследствие взаимодействия глюонов с глюонами (КХД).

В квантовой хромодинамике аналогичные эффекты оказываются значительными и в корне меняют характер взаимодействия на «больших» расстояниях. Большими мы здесь называем расстояния порядка 10^{-13} см — это типичные размеры частиц, состоящих из легких кварков. Вследствие того, что глюоны сами являются источниками поля, в КХД наряду с процессами, изображенными диаграммами на рис.3,*б* возможны и процессы с глюонными петлями, представленные диаграммами на рис.3,*в*. Их вклад можно рассчитать, и результаты вычислений показывают, что эффективный заряд в КХД не уменьшается с расстоянием, а неограниченно растет, поэтому частица с цветовым зарядом (кварк или глюон) не может улететь бесконечно далеко. Квантовая хромодинамика допускает и более сложные флуктуации, не описываемые простейшими петлевыми диаграммами. Детальные характеристики таких вакуумных флуктуаций не поддаются расчету, но их влияние зачастую оказывается заметным или даже определяющим. Особенно чувствительны к обсуждаемым эффектам мезоны, состоящие из легких кварков. Это связано с тем, что в таких мезонах кварки находятся преимущественно на больших расстояниях друг от друга ($\approx 10^{-13}$ см), а в системе тяжелых кварков ($c\bar{c}$ или $b\bar{b}$) они сосредоточены на меньших расстояниях, где взаимодействие подобно кулоновскому. В нарисованной нами картине благодаря нелинейному взаимодействию глюонных полей вполне могли бы найти себе место более сложные мезоны, состоящие, например, из одних только глюонов (глюболы) или из кварк-антикварковой пары и глюона (гибриды). В электродинамике же невозможно наличие стационарных или квазистационарных объектов, состоящих из одних только фотонов: мы даже вообразить не можем лежащий на столе клубок радиоволн. Нет там и гибридов — состояний, обязанных своим существованием возбуждению самого электромагнитного поля, а не его источников. Именно указанное различие позволяет надеяться, что поиск и исследование глюболов и гибридов являются одним из ключевых средств для понимания специфики сильных взаимодействий. Попробуем представить себе, какими свойствами должны обладать глюболы и гибриды, как их можно найти экспериментально и узнать, что это именно они.

1. У глюболов подавлено электромагнитное взаимодействие, поскольку внутри нет электрически заряженных частиц — кварков.

2. Глюболы должны заметно чаще рождаться в тех реакциях, где конечные состояния формируются из глюонов.

3. Глюболы должны особенно легко распадаться на те мезоны, которые имеют сильную связь с глюонами, т.е. с большой вероятностью переходят в систему глюонов.

4. Глюболы взаимодействуют со всеми кварками одинаково и поэтому переходят в состояния, содержащие $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ и $s\bar{s}$ с одинаковой вероятностью.

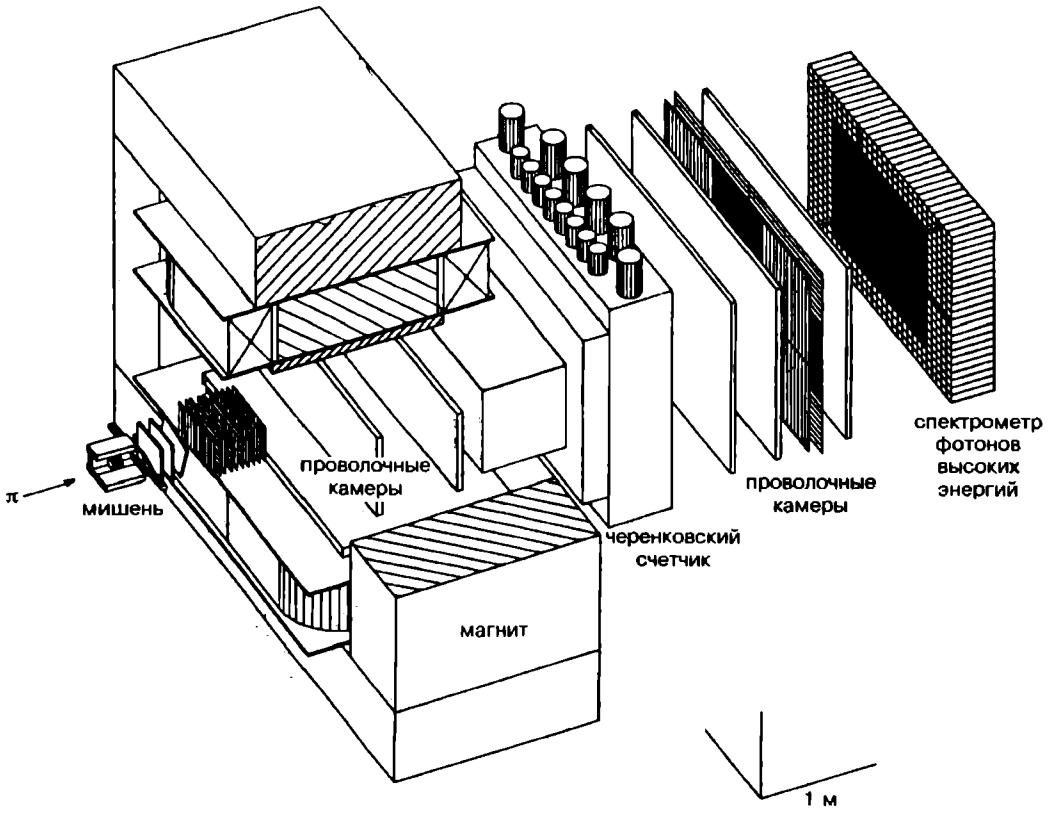


Рис.4. Схема BEC.

5. Глюболы являются дополнительными[2] к $q\bar{q}$ состояниями, поэтому, обнаружив слишком много для $q\bar{q}$-модели резонансов с характерными для глюболов квантовыми числами, можно рассматривать лишние резонансы в качестве кандидатов в глюболы.

Модельные расчеты позволяют придать приведенным выше соображениям конкретный количественный смысл и показывают, что легчайший глюбол должен иметь квантовые числа $J^{pc} = 0^{++}$ и массу в районе 1—2 ГэВ/c^2.

Для гибридов следует ожидать аналогичные свойства (за исключением первого) с некоторыми изменениями формулировок, а также еще одной особенности, делающей поиски гибридов особенно привлекательными. Гибриды могут иметь квантовые числа не только такие же, как и обычные мезоны, но и экзотические, которые нельзя получить в системе $q\bar{q}$. Так, из пары кварк—антикварк можно построить три различных состояния с полным моментом J=1: $J^{pc} = 1^{--}$, 1^{++} и 1^{+-}. Состояния с $J^{pc} = 1^{-+}$ в этом списке нет, система кварк-антикварк таких квантовых чисел иметь не может. Добавление к паре кварк-антикварк глюонов снимает это ограничение, так что для гибридов возможны и экзотические квантовые числа. Более того, модельные расчеты показывают, что мезоны с квантовыми числами $J^{pc} = 1^{-+}$ должны быть не слишком тяжелыми (m = 1.5—2 ГэВ/c^2) и вполне доступными наблюдению и исследованию.

[2] Из трех легких кварков и антикварков можно построить всего девять состояний, комбинируя их различным образом: $u\bar{u}$, $u\bar{s}$, $s\bar{d}$ и т.д.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА УСТАНОВКЕ «ВЕРШИННЫЙ СПЕКТРОМЕТР»

Поиски экзотических мезонов во множестве самых разнообразных экспериментов привели к обнаружению нескольких подозрительных резонансов, не укладывающихся в простейшую $q\bar{q}$-схему. Распространено представление о том, что без «экзотики» невозможно описать совокупность наблюдаемых явлений. Вместе с тем, нет ни одного вполне надежно идентифицированного глюбола или гибрида, и общая картина экзотических состояний пока очень далека от завершения.

Интересные результаты в этой области получены в Институте физики высоких энергий на ВЕС (рис.4). В качестве источника частиц высоких энергий используется синхрофазотрон, ускоряющий протоны до энергии 70 ГэВ. Эти протоны взаимодействуют с мишенью и образуют множество вторичных частиц, среди которых основная часть — π-мезоны. При помощи магнитных систем π^--мезоны с заданным импульсом в диапазоне 30—40 ГэВ/c транспортируются от мишени ускорителя к установке, где взаимодействуют со вторичной мишенью. В результате этих взаимодействий образуются различные частицы, среди которых могут быть экзотические мезоны. Большая часть частиц очень быстро распадается, так что через детекторы летят в основном заряженные π-мезоны и фотоны с энергиями в несколько ГэВ. Для регистрации заряженных частиц применяются проволочные камеры, которые состоят из системы проволочных электродов в газовом объеме. Заряженные частицы, проходящие через детектор, ионизируют газ, и образовавшиеся электроны под действием приложенного к электродам поля дрейфуют к ближайшим сигнальным проволочкам. Возникающие электрические сигналы регистрируются подключенными к электродам приборами. В камерах ВЕС насчитывается свыше восьми тысяч сигнальных проволочек; рабочая площадь самой большой камеры 2.0×2.5м.

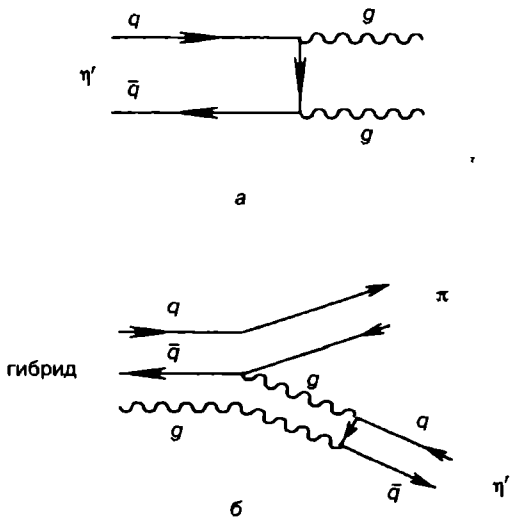


Рис.5. Диаграммы процессов с участием η'-мезона: а) переход $q\bar{q}$ в gg; б) распад состояния $J^{PC} = 1^{-+}$ на $\eta\pi$.

Для определения импульсов заряженных частиц используется электромагнит, в котором частицы с разными импульсами отклоняются на разные углы. После магнита расположен многоканальный счетчик, регистрирующий вызываемое заряженными частицами черенковское излучение. По интенсивности этого излучения можно узнать скорости частиц и при уже известном импульсе определить массу, а следовательно, и сорт частиц (π- и K-мезоны, протоны). Детектор фотонов высоких энергий представляет собой матрицу из тяжелого стекла (хрусталя), состоящую из 1600 отдельных призм. Высокоэнергетический фотон, попав в детектор, благодаря электромагнитному взаимодействию с ядрами порождает большое количество электронов и фотонов — электромагнитный каскад. Возникающее при движении электронов и позитронов черенковское излучение регистрируется фотоумножителями, расположенными на каждой призме. Электрические сигналы от всех детекторов установки поступают в систему сбора данных, где преобразуются в цифровую форму и в том случае, если событие представляет

интерес для дальнейшего анализа, записываются на магнитную ленту. Обработка полученной информации требует нескольких лет работы группы физиков и состоит из множества шагов, среди которых главные — восстановление картины каждого индивидуального события по записанным данным и анализ накопленной статистики с целью решения тех или иных физических задач. За шесть лет исследований на установке ВЕС набрана уникальная статистика — почти миллиард взаимодействий. Часть данных обработана, получено немало новых результатов о свойствах мезонов. Мы выделили два из них:

— наблюдение экзотических свойств у состояния $J^{pc}=1^{-+}$ в реакции $\pi^- A \to \pi^- \eta' A$ (A — ядро бериллия);

— обнаружение аномалий в распадах резонанса $\pi(1800)$.

В первом из этих экспериментов[3] проведено параллельное исследование двух реакций, возникающих при взаимодействии π-мезонов с ядром бериллия:

$$\pi^- A \to \pi^- \eta A, \quad (1)$$

$$\pi^- A \to \pi^- \eta' A. \quad (2)$$

С точки зрения кварковой модели η- и η'-мезоны очень похожи друг на друга: оба мезона имеют квантовые числа $J^{pc} = 0^{-+}$, оба состоят из суперпозиции $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ и $s\bar{s}$ кварков и образуются в обычных сильных взаимодействиях с примерно одинаковыми вероятностями. Оказывается, это представление о структуре η'-мезона является недостаточным, поскольку такой мезон должен иметь массу $\approx$400 МэВ/c^2, тогда как масса η'-мезона 950 МэВ/c^2. Причина состоит в том, что этот мезон обладает особенно сильной связью с глюонами, так что система кварк—антикварк легко переходит в систему глюонов (рис.5,*а*). Образно говоря, η'-мезон часть времени существует в виде глюонной системы, что существенно меняет его характеристики. Таким образом, изучение реакций с участием η- и η'-мезонов позволяет почувствовать вклад глюонов в эти процессы. Процессы (1) и (2) выделялись из огромного числа других реакций главным образом благодаря специфическим каналам распада η- и η'-мезонов: $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0(\gamma\gamma)$, $\eta' \to \pi^+\pi^-\eta(\gamma\gamma)$. Относительная интенсивность образования состояний с теми или иными квантовыми числами определялась посредством анализа угловых распределений продуктов распада. Это трудоемкая задача, требующая значительных интеллектуальных усилий и больших вычислительных мощностей. Было обнаружено, что в реакции (1) наиболее интенсивно образуется состояние с квантовыми числами $J^{pc} = 2^{++}$, а основной вклад в реакцию дает известный распад $a_2(1320) \to \eta\pi$. В реакции (2) также заметен распад $a_2 \to \eta'\pi$ (это первое наблюдение такого распада), но основной вклад дает состояние с экзотическими квантовыми числами $J^{pc} = 1^{-+}$. В системе $\eta'\pi$ (реакция (2)) такое состояние возникает в несколько раз интенсивнее, чем в реакции (1). Это очень яркое явление находит естественное объяснение в рамках гибридной модели. Представим себе, что состояние $J^{pc} = 1^{-+}$ построено из кварка, антикварка и глюона. Тогда распады на $\eta\pi$ и $\eta'\pi$ описываются диаграммами, изображенными на рис.5,*б*, и именно для них ожидается усиление канала $\eta'\pi$ в силу сильной связи η' с глюонами. Таким образом, результаты этого эксперимента свидетельствуют о том, что экзотическое состояние $J^{pc} = 1^{-+}$ в данном случае действительно построено из кварк—антикварковой пары и глюона, а не, например, из многокварковой системы. В настоящее время мы не можем сказать, образуются ли при этом связанные состояния или нет. Другими словами — существует ли в системе кварк—антикварк и глюон с квантовыми числами $J^{pc} = 1^{-+}$ притяжение, достаточное для того, чтобы связать их, или, может быть, наоборот, они отталкиваются друг от друга и разлетаются, не пожив вместе, чтобы затем быстро превратиться в мезоны. Это

[3] Beladidze G.M. et al. // Phys. Lett. 1993. V.B313. P.276.

предмет дальнейших исследований. Следует, однако, подчеркнуть, что в данном эксперименте впервые удалось обнаружить гибридные черты состояния с экзотическими квантовыми числами.

Другой эксперимент, проведенный на ВЕС[4], посвящен исследованию резонанса $\pi(1800)$. Первое и до последнего времени единственное указание на существование этого объекта было получено еще в 1984 г. Работы на ВЕС позволили надежно установить факт существования такого резонанса и определить его основные характеристики. Его квантовые числа точно такие же, как и у обычного π-мезона, только он намного тяжелее. Для того чтобы понять, является ли этот резонанс обычным мезоном или же гибридным объектом, были изучены различные варианты его распада. При исследовании большого количества различных реакций обнаружено, что в одних случаях наблюдается резонанс с массой 1800 МэВ/c^2 и квантовыми числами $J^{pc} = 0^{-+}$, а в других не наблюдается, причем отсутствуют именно те распады, которые бывают интенсивными у обычных мезонов. Естественное объяснение эти данные находят в рамках модели глюонной трубки[5]. Можно ожидать, что в результате взаимодействия с вакуумными флуктуациями глюонное поле, создаваемое кварком и антикварком, не распространяется во все стороны, как это описывается в электродинамике, а сосредоточивается преимущественно в области между кварком и антикварком в виде трубки конечной толщины, как бы сжимается вакуумом. Существуют экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу такой модели мезонов. В обычных мезонах эта трубка находится в основном состоянии, а разные мезоны образуются благодаря различным взаимным состояниям кварков. Переход же самой трубки в возбужденное состояние приводит к появлению совершенно новых объектов, отождествляемых с гибридами. В том случае, если масса мезона достаточна велика, он распадается на два других мезона путем рождения кварк—антикварковой пары из вакуума. Расчеты в этой модели показывают[6], что кварк-антикварковый мезон $\pi(1800)$ должен был бы распадаться на $\rho\pi$, отсутствие этого распада в эксперименте является аномалией, требующей объяснения. Заметим, что и в ρ- и в π-мезонах кварки не имеют относительного орбитального момента ($L = 0$). В данной модели гибридные мезоны не могут распадаться на два мезона, содержащие кварк-антикварковую пару с $L = 0$, а предпочитают распадаться на один мезон с $L = 0$ и другой с $L = 1$. Именно такая картина и наблюдается в распадах $\pi(1800)$. Во всех зарегистрированных распадах один из мезонов состоит из кварк-антикварковой пары в состоянии с $L = 1$, а другой — с $L = 0$, в то время как распады на два мезона с $L = 0$, например $\pi(1800)\to\rho\pi$, подавлены. Казалось бы, можно торжествовать победу: вот он, гибрид! Однако выяснилось, что интерпретация этого объекта не вполне однозначна. С одной стороны, заключение о гибридных свойствах $\pi(1800)$ делается из сравнения его характеристик с предсказанными моделью глюонной трубки, содержащей ряд предположений и упрощений. С другой стороны, в этой области масс можно ожидать существования радиальных возбуждений π-мезона. Характеристики этих состояний не поддаются детальному расчету, так что состояния вполне могут имитировать гибридные мезоны. Очень важным для интерпретации $\pi(1800)$ как гибридного мезона может оказаться наблюдаемый на ВЕС распад $\pi(1800)\to f_0(1500)\pi$. Резонанс $f_0(1500)$ с квантовыми числами $J^{pc} = 0^{++}$ — признанный кандидат в глюболы, поскольку имеет почти все

[4] Amelin D.V. et al. // Phys. Lett. 1995. V.B356. P.595.

[5] Isgur N., Paton J. // Phys. Rev. 1985. V.D31. P.2910.

[6] Close F.E., Page Ph.R. // Nucl. Phys. 1995. V.B443. P.233; Close F.E., Lipkin H.J. // Phys. Lett. 1996. V.B372. P.306.

перечисленные в первом разделе признаки глюбола. Для гибридных мезонов естественно ожидать повышенной вероятности распада на обычные мезоны и глюболы, ибо гибриды несут в себе и кварк-антикварковые пары, и глюоны. Возможно, именно этим объясняется появление $f_0(1500)$ в распадах $\pi(1800)$.

* * *

Эксперименты по поиску гибридных мезонов, выполненные на ВЕС в Институте физики высоких энергий, позволили обнаружить существование состояний с экзотическими квантовыми числами $J^{pc} = 1^{-+}$, обладающих гибридными чертами. У одного из мезонов с обычными, неэкзотическими квантовыми числами выявлены аномальные свойства, напоминающие те, что ожидаются для гибридных мезонов.

Значительная часть этих работ — изучение ряда распадов $\pi(1800)$, в том числе распада $\pi(1800) \to f_0(1500)\pi$, а также общий анализ спектра мезонов с квантовыми числами $J^{pc} = 0^{-+}$ и $J^{pc} = 1^{-+}$ — выполнена при поддержке Фонда Сороса. Кроме того, при поддержке этого фонда получены экспериментальные данные, необходимые для дальнейшего изучения рассматриваемых проблем. На сегодняшний день исследования экзотических мезонов далеко не завершены. Самый жизнерадостный сценарий состоит в том, что мы уже ясно видим гибриды и глюболы, и эксперименты ближайшего будущего позволят понять свойства этих объектов и тем самым дадут ключ к постижению особенностей сильных взаимодействий в рамках КХД. Мы начнем понимать, как в результате нелинейного взаимодействия глюонов формируется глюонная трубка, как она рвется, как устроены вакуумные флуктуации и как с ними взаимодействуют кварки и глюоны. Вполне возможен и другой сценарий, состоящий в том, что в данном случае мы встретились с эффектом чеширского кота (Л.Кэролл. «Алиса в стране чудес»), когда улыбку обнаруживаем задолго до самого ее владельца. Может быть, мы еще слишком плохо понимаем наблюдаемые явления.

Здесь уместно отметить, что обсуждаемый нами раздел науки — квантовая хромодинамика — является представителем очень широкого класса квантовых теорий поля, где переносчики взаимодействия сами являются источниками полей. В известном смысле старая, добрая электродинамика может рассматриваться в качестве вырожденной теории, не предполагающей такой ситуации. Вызывает большой энтузиазм осознание того факта, что пути изучения принципиально новых свойств материи, предсказываемых квантовой теорией поля и не имеющих прямых аналогов в КЭД, отчетливо просматриваются, и эти исследования несомненно принесут более глубокое понимание совершенства Природы.

КОРОТКО

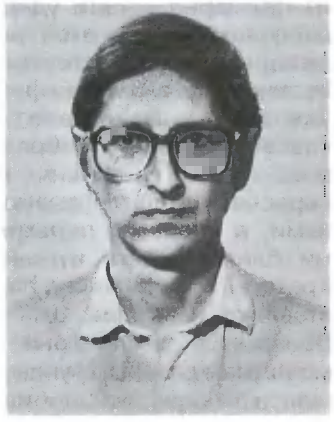
•

Северные гренландские киты населяют воды Атлантики у восточного побережья Северной Америки. За XX в. их численность упала примерно с 10 тыс. до 300. Биологи из Национального управления США по изучению океана и атмосферы полагают, что главный виновник нависшей над ними угрозы — человек. С 1995 г. по начало 1997 г. зафиксировано 14 случаев смерти гренландских китов, причем девять из них погибли от столкновения с судами или запутались в рыболовных сетях. В связи с этим в США принят закон, обязывающий морские суда, гидросамолеты и др. «уступать дорогу» китам. Всякое судно, с борта которого замечен кит, отныне должно держаться не менее чем в 500 м от него, учитывая при этом, что киты могут передвигаться со скоростью до 5 км/ч.

New Scientist. 1996. V.153. № 2070. P.9 (Великобритания).

Первая схема глобальной стратиграфии Венеры

А. Т. Базилевский



Александр Тихонович Базилевский, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН. Специалист в области геологии и геохимии планет. Участник космических экспериментов: «Луноход-1 и -2», «Луна-16, -20, -24», «Марс-4, -5», «Венера-9, -10, -13, -14, -15, -16». Гость-исследователь в американских космических проектах «Вояджер-Нептун» и «Магеллан». Лауреат Государственной премии СССР (1989).

КАК ЭТО НАЧАЛОСЬ?

Работа, о которой пойдет речь в этой статье, началась в 1993 г. несколько неожиданно для меня. В то время я был гостем-исследователем в американской программе исследования Венеры с помощью радиолокатора, установленного на космическом аппарате «Магеллан». Я изучал изображения, полученные этим аппаратом, пытаясь понять геологию тех районов, где советские космические аппараты «Венера-8, -9, -10, -13, -14» и «Вега-1, -2» провели измерения химического состава поверхности планеты. В команде «Магеллана» шли горячие споры о характере геологической истории этой планеты. Горячность споров понятна: изучение Венеры — один из путей к пониманию геологической истории ранней Земли.

Высказывались две противоположные точки зрения. Согласно одной из них, около 500—300 млн лет назад на Венере происходили столь обширные излияния вулканических лав и интенсивные тектонические деформации, что в течение сравнительно короткого промежутка времени это привело к почти полному обновлению поверхности планеты[1]. Затем вулканическая и тектоническая активность резко снизилась, хотя и не угасла полностью. На то указывали два обстоятельства:

1) распределение ударных кратеров по поверхности Венеры не отличается от случайного;

2) подавляющее большинство кратеров явно наложено на равнины, составляющие 80—90% поверхности

© А.Т.Базилевский

[1] Schaber G.G., Strom R.G., Moore H.J. et al. // J. Geophys. Res. 1992. V.97. P.13256—13301.

планеты, и лишь очень небольшая часть кратеров подтоплена более молодыми лавами.

Сторонники противоположной точки зрения, опираясь на те же наблюдения, рисовали совершенно иную картину[2]. Они полагали, что вулканическая и тектоническая активность планеты в целом оставалась примерно одинаковой, но в разное время концентрировалась в разных областях. Математическое моделирование показывало, что если каждая из таких областей была не более 400 км в поперечнике и они распределялись по поверхности Венеры случайным образом, то получалось и случайное распределение кратеров, и малое число кратеров, подтопленных молодыми лавами.

Первую точку зрения ее авторы, Дж.Шабер из Геологической службы США и Р.Стром из Аризонского университета, назвали моделью глобального обновления поверхности. Вторую точку зрения, в развитии которой ведущую роль сыграл Р.Филлипс из Университета им. Вашингтона, штат Миссури, стали называть моделью равновесного обновления поверхности. Мне чисто интуитивно больше нравилась модель глобального обновления поверхности, но я в эти споры не вмешивался, полагая, что таким лакомым кусочком, как характер геологической истории Венеры, должны заниматься хозяева эксперимента.

Однако, изучая геологию мест посадки аппаратов «Венера» и «Вега», я не удержался от вовлечения в этот спор. К югу и востоку от мест посадки «Веги-1» и «Веги-2» находится протяженная зона глубоких тектонических впадин, очень похожих на рифтовые зоны континентов Земли. С ними, как и на Земле, связаны лавовые излияния. По соотношениям с окружающими их равнинами уже было ясно, что эти рифтовые зоны Венеры и связанный с ними вулканизм моложе равнин. Но если средний возраст равнин Венеры к тому времени был определен (~300—500 млн лет), то время рифтогенеза оставалось неизвестным.

Изучая радарные изображения рифтовых зон и их окрестностей, я обратил внимание на то, что с тремя из примерно десяти ударных кратеров, расположенных в этой рифтовой зоне, ассоциируют радиотемные зоны, параболической в плане формы, что, как уже было установлено, есть признак совсем недавнего образования кратеров. Один из таких кратеров был пересечен рифтообразующими трещинами, а трещины перекрывались лавами близлежащего вулкана горы Маат. Кратеры с темными параболами составляют не более 10% всех кратеров Венеры, и если они — наиболее молодые кратеры группы, для накопления которой понадобилось 300—500 млн лет, то кратеры с параболами должны быть не древнее 30—50 млн лет. А значит, что по крайней мере в этом месте рифтообразование и вулканизм происходили всего 30—50 млн лет назад, а может быть, и позже[3].

Такой результат представлял собой прямое вмешательство в спор моих коллег по команде, и я решил проверить, есть ли аналогичные очень молодые тектоника и вулканизм и в других районах Венеры. С этой целью был проведен фотогеологический анализ изображений в окрестностях 36 кратеров с параболами, расположенных (в силу случайности метеоритных ударов) случайным образом на поверхности планеты, что делало результаты моего исследования представительными. Вместо того, чтобы быстро посмотреть, есть молодая активность или ее нет, я проявил определенное занудство и систематически описал геологию всех 36 районов. По мере описания районов неожиданно стала вырисовываться определенная возрастная последовательность геологических образований — то, что в земной

[2] Phillips R., Raubertas R.F., Arvidson R.E. et al. // J. Geophys. Res. 1992. V.97. P.15923—15948.

[3] Basilevsky A.T.// Geophys. Res. Lett. 1993. V.20. P.883—886.

геологии называется стратиграфической схемой. Это было уже слишком серьезно, чтобы доверять лишь своим наблюдениям, и я привлек к нашей работе Дж.Хэда из Университета Брауна (США), с которым мы давно сотрудничаем в изучении планет. Вскоре пришла пора моего возвращения в Россию, где в это время Международный научный фонд объявил конкурс исследовательских проектов. Посоветовавшись с коллегами по лаборатории сравнительной планетологии и метеоритики ГЕОХИ РАН, я подал заявку на грант по изучению геологической истории Венеры, и мы этот грант получили.

ЧТО УДАЛОСЬ СДЕЛАТЬ?

История геологического развития какого-либо района или планеты в целом читается по возрастной последовательности геологических образований. Характерная последовательность вещественных, преимущественно лавовых, комплексов и разного рода тектонических деформаций, которую мне и профессору Хэду удалось установить в 36 районах поверхности Венеры, и явилась той основой, с которой началась работа по гранту. Намечающуюся схему стратиграфии Венеры надо было проверить, уточнить и дополнить в новых районах, и наилучший метод для этого — геологическое картирование. Ведь когда составляется геологическая карта, на ней не должно быть белых пятен, и приходится изучать, классифицировать и картировать — конечно, с учетом масштаба карты — каждое образование, каждый участок поверхности. За время работы по гранту наша группа, анализируя радарные изображения поверхности Венеры с разрешением 120—220 м, полученные космическим аппаратом «Магеллан», смогла закартировать в масштабе 1:10 000 000 (в 1 см 100 км) около 20% поверхности Венеры, проверив наш первый вариант стратиграфической схемы и существенно уточнив его.

По уточненной схеме[4] среди наблюдаемых на снимках «Магеллана» образований выявляется пять различающихся по относительному возрасту вещественных комплексов и несколько типов тектонических деформаций.

Комплекс 1, самый древний и являющийся фундаментом для других, представлен веществом так называемых тессер — участков поверхности, рельеф которых образован пересечениями систем тектонических хребтов и ложбин (рис.1). Тессеры занимают около 10% поверхности Венеры, образуя «острова» и «континенты» среди вулканических равнин. Природа их вещества неизвестна. Среди тектонических деформаций, которые, собственно, и образуют ту сложнопересеченную местность, которую мы называем тессерой, некоторые исследователи выделяют более ранние структуры сжатия (хребты) и более поздние структуры растяжения (расщелины).

Комплекс 2 представлен веществом равнин, наверно базальтовых, деформированных плотно прилегающими друг к другу параллельными разломами (рис.2), по-видимому, образующими системы так называемых грабенов, формирующихся в обстановке растяжения. Останцы этих густотрещиноватых равнин обычно наблюдаются в виде небольших островов, слегка возвышающихся над более молодыми равнинами и занимающих около 3% поверхности планеты.

Комплекс 3 представлен веществом базальтовых (судя по морфологии) равнин, характерный признак которых — присутствие относительно широких (5—10 км) протяженных гряд, вероятно складок сжатия (рис.3). Иногда эти гряды образуют пояса, возвышающиеся над более молодыми равнинами и протягивающиеся на тысячи километров. Выходы комплекса 3 занимают около 3% поверхности планеты.

Комплекс 4 представлен вещест-

[4] Базилевский А.Т., Хэд Дж.// Астрон. вестн. 1995. Т.29. № 3. С.195—218; Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Kryuchkov V.P., Pronin A.A. Geologic history of Venus: Model 96 // Ann. Geophys. Part III, Space & Planetary Sciences. Suppl. III 1996. V.14. P.791.

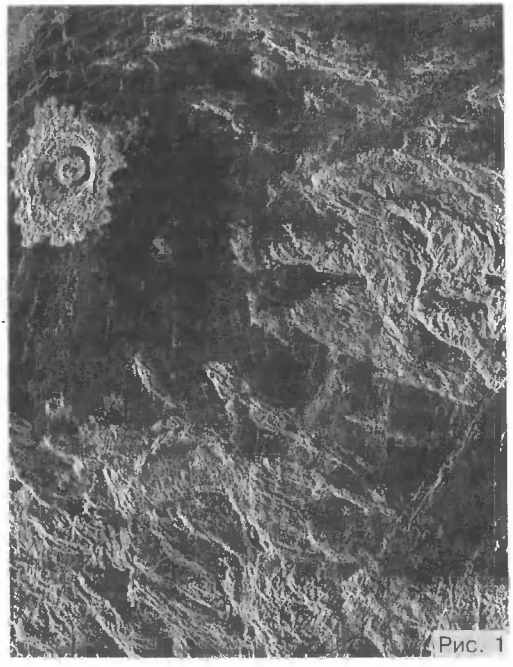


Рис. 1

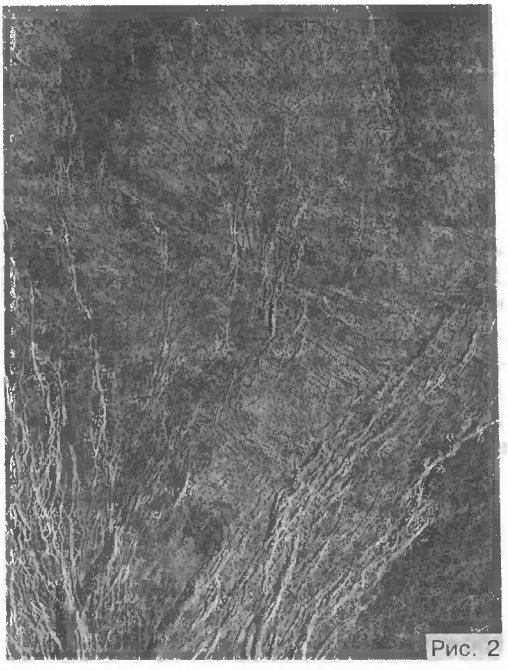


Рис. 2

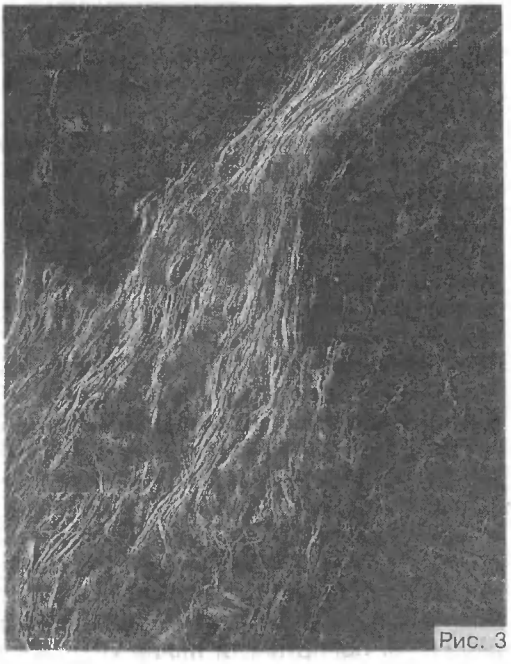


Рис. 3

Рис. 4

Рис.1. Острова тессеры (комплекс 1), подтопленные радиотемным веществом вулканической равнины комплекса 4, на который наложен ударный кратер (вверху слева). Север тессеры Фортуны. 180×240 км. Здесь и далее север наверху.

Рис.2. Густо трещиноватая местность, сложенная веществом комплекса 2 и пересеченная веером трещин рифта Ганики. 135×180 км.

Рис.3. Пояс гряд, сформированный из вещества комплекса 3, подтопленный вулканическими равнинами с извилистыми грядами (комплекс 4).

Рис.4. Вулкан Шапаш, сложенный лавами комплекса 5. 270×360 км.

вом базальтовых равнин (состав определялся космическими аппаратами «Венера-9, -10» и «Вега-1, -2»), покрытых характерными узкими (1 км) грядами, очевидно тоже складками сжатия (см. рис.3). Именно этими равнинами занято 70—75% поверхности Венеры. Подавляющее их большинство на изображениях «Магеллана» выглядит монотонно серыми. Но местами видны и явно более молодые лавовые потоки с повышенным радиоотражением (на изображениях — светло-серые). Оба типа равнин как бы накрыты сеткой деформирующих их извилистых гряд.

Под сеткой этих гряд находится и совсем недавно выделенная нами разновидность равнин комплекса 4 — холмистые равнины, образованные скоплениями небольших вулканов. В зоне развития таких равнин находится место посадки космического аппарата «Венера-8», который обнаружил в материале поверхности высокие содержания калия, урана и тория, не характерные для обычных базальтов.

Комплекс 5 представлен веществом вулканических лав, образующих равнинные участки, тяготеющие к рифтовым зонам или кольцевым вулканотектоническим структурам. К этому же типу отнесены лавы крупных (сотни километров в поперечнике) вулканов (рис.4), тоже связанных с рифтовыми зонами. Обе разновидности лав занимают 10—15% поверхности планеты. Они накладываются на все перечисленные выше комплексы и не нарушаются характерными для других комплексов деформациями. Судя по морфологии потоков, лавы комплекса 5 тоже базальтовые, что подтверждается измерениями аппарата «Венера-14».

ЧТО ЭТО ЗНАЧИТ?

Описанная выше последовательность вещественных, в основном лавовых, комплексов и нарушающих их тектонических деформаций и есть впервые созданная схема, или модель, стратиграфии Венеры. На первый взгляд ей могут соответствовать два совершенно различных сценария геологической истории планеты. Один из них предполагает, что такая последовательность вещественных комплексов и деформаций образовывалась более или менее одновременно (синхронно) по всей планете — сначала тессеры, потом комплексы деформированных равнин, потом недеформированные равнины и крупные вулканы. Другой сценарий предполагает, что выявленная последовательность не была глобально синхронной, а представляет собой типичный тектономагматический цикл, реализующийся в разных районах планеты в разное время.

Интересно, что два этих сценария (синхронного и несинхронного развития) возвращают нас к упомянутой в начале статьи дискуссии о характере геологической истории Венеры. Модель глобального обновления поверхности согласуется со сценарием синхронного развития, а модель равновесного обновления согласуется со сценарием несинхронного развития. Это, однако, не означает, что мы пришли к тому, с чего начинали. Выявленная нами последовательность вещественных комплексов и деформаций — не только конкретика событий геологической истории Венеры, но и способ решения спора о характере этой истории.

Действительно, если бы выявленная нами последовательность формировалась, как того требует модель равновесного обновления, в разных областях в разное время, то на границах двух соседних областей мы должны были бы видеть наложение одной последовательности на другую. Но мы нигде этого не увидели. Это означает, что по крайней мере в пределах изученных нами 20% поверхности модель равновесного обновления не работает и сценарий несинхронного развития не подтверждается.

Что же получается в рамках сценария синхронного развития? Где-то 500—300 млн лет назад, а может быть, на 100—200 млн раньше, существенная часть поверхности Венеры подверглась интенсивным тектоничес-

ким деформациям, за которыми последовала серия практически глобальных эпизодов излияний базальтовых лав, перемежаемых менее интенсивными деформациями, сначала растяжения, а потом сжатия. Затем масштабы вулканической и тектонической активности сильно уменьшились, и она сосредоточилась в основном в рифтовых зонах или вблизи их.

Этот основанный на наблюдениях сценарий, как уже говорилось, согласуется с моделью глобального обновления поверхности, что, однако, не есть доказательство ее справедливости. Ведь суть модели в том, что значительная часть геологической активности Венеры была сконцентрирована в самом начале наблюдаемого отрезка истории планеты, а выявленная нами стратиграфическая последовательность и основанный на ней сценарий синхронного развития говорят лишь об относительных, а не абсолютных возрастах.

ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ?

Прежде всего надо посмотреть, что делается на остальных 80% поверхности Венеры. Бегло мы, конечно, уже посмотрели. Вроде бы ничего неожиданного пока не увидели. Но надежный ответ можно будет дать только после систематического геологического картирования. Все необходимые материалы у нас есть. Нужно лишь время — года два-три, что немного, если вспомнить, что Венера — планета размером с Землю, да деньги, чтобы, сложив их с нашей «академической» зарплатой, эти два-три года прожить.

Главное, что нужно сделать для серьезного понимания геологической истории Венеры, — определить абсолютный возраст выделенных нами вещественных комплексов. Если это сделать удастся, станет абсолютно ясно, концентрировалась ли значительная часть вулканической и тектонической активности в начале изучаемого отрезка истории Венеры или она была более или менее равномерно растянута во времени. Первые оценки, которые сделаны по плотности ударных кратеров, наложенных на некоторые вещественные комплексы, и по результатам компьютерного моделирования конкуренции вулканизма и кратерообразования, как будто подтверждают модель глобального обновления. Но именно «как будто», так как точность их невелика. Нужно работать дальше.

Основа понимания геологической истории Венеры теперь заложена: глобальная схема стратиграфии Венеры создана. Плохая или хорошая, но первая. Стоит вспомнить, однако, Ю.М.Лотмана[5]: «Слово «понимание» коварно. Невольно навязывается представление, что это однократный, исчерпывающий акт... В действительности это путь в бесконечность». Похоже, мы занимаемся именно этим.

[5] Лотман Ю.М. Беседы о русской культуре. СПб., 1994.

КОРОТКО

•

С марта 1996 г. в Великобритании зарегистрировано 10 случаев новой разновидности болезни Крейцвельдта-Якоба (nv-CJD), появление которой связывают с коровьим безшенством (bovin spongiform encephalopathy, BSE). Специалисты ВОЗ повсеместно разъясняют особенности дифференциальной диагностики этого заболевания, что важно, поскольку в том же году в странах Западной Африки были отмечены два случая спорадической традиционной болезни CJD, не связанной с BSE.

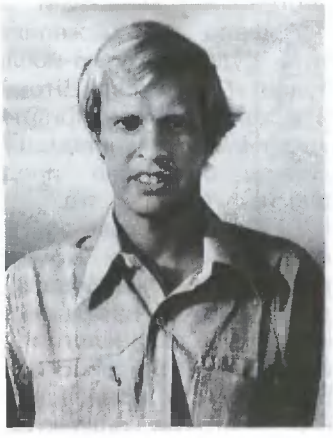
Press Release World Health Organization. № 53. 4 July 1997.

Открытие нового тектонического пояса на Балтийском щите

А. А. Островский

Так выпьем же за наших учителей!

Тост Петра I в честь пленных шведских генералов после победы русских под Полтавой



Алексей Алексеевич Островский, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории сейсмических исследований земной коры и верхней мантии под океанами Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН. Область научных интересов — морская геофизика.
Автор решил поместить здесь фотографию десятилетней давности — на память о славных экспедиционных странствиях, о временах, когда небо казалось безоблачным, а впереди и позади был лишь прекрасный синий океан...

ИСТОРИЯ, МЕТОД И ПЕРВЫЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной статье приводится редкий пример того, как тщательный анализ уже опубликованных и интерпретированных данных может привести к открытию геотектонического объекта, пропущенного предыдущими исследователями.

Речь пойдет о применении метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), который представляет собой акустическое просвечивание верхних слоев Земли, отдаленно напоминая рентгеновское обследование. Обычно начальный этап глубинного сейсмического зондирования включает расстановку вдоль линейного профиля регистрирующих устройств (донных или сухопутных сейсмографов) и последующее проведение вдоль профиля зондирований (взрывов или пневмоизлучений). Цель исследований — получение моделей распределения скоростей распространения упругих (сейсмических) волн в литосфере Земли (верхней твердой оболочке, подстилаемой слегка расплавленными глубинными породами). Сейсмические модели — основа для геотектонических построений, показывающих, как сформировались те или иные геологические структуры в земной коре и на поверхности Земли. Такие построения необходимы для регионального прогноза месторождений полезных иско-

© А.А.Островский

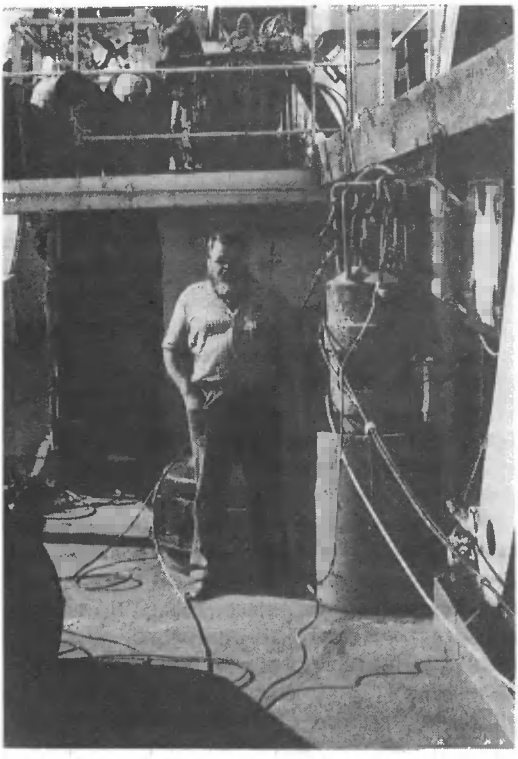


Рис. 1. Создатель гигантского пневмоисточника В.А. Орехов со своим «детищем».

паемых. Несмотря на то, что ГСЗ является фундаментальным исследованием, конечная его цель — практический интерес. Однако, планируя сейсмический эксперимент в Балтийском море, мы не ставили перед собой столь далекие цели. Главной задачей тогда было испытание нового советского чуда техники — самого большого в мире сейсмического пневмоисточника (ПИ) объемом 120 л. Пневмоисточник представлял собой массивную цилиндрическую железную конструкцию высотой с человеческий рост и весом в одну тонну. Один из его создателей — инженер В.А.Орехов — весьма упитанный мужчина с внешностью Карла Маркса (рис. 1). Впоследствии слайд с изображением стоящих рядом чуда техники и создателя вместе с моим комментарием: «Яблоко от яблони недалеко падает», — неизменно вызывали живую реакцию аудитории. Сейчас сломавшееся чудо как символ временных трудностей науки и техники в ржавом виде валяется на территории Института океанологии.

Оглядываясь назад, в 1989 г., приходится удивляться, как много совпадений и простого везения позволили выполнить все планируемые работы. Начать с того, что экспедиция вообще могла не состояться, так как в то время заканчивался период устойчивого бюджетного финансирования Института океанологии Академии наук и все висело на волоске. Удачно вышло, что предполагаемое сотрудничество с финскими сейсмологами помешало другим желающим перехватить судно (научно-исследовательское судно «Профессор Штокман»). Повезло и в том, что предприятие[1], изготовившее гигантский пневмоисточник, согласилось бесплатно предоставить его для испытаний, и т.д.

Практическая же фаза проекта началась с того момента, когда не любивший командовать автор, был-таки назначен начальником экспедиции Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН (23-й рейс НИС «Профессор Штокман») и принялся ломать голову над тем, как эффективнее испытать чудо техники. Район Балтийского моря отличается глубоким (40—50 км) залеганием одной из главных сейсмических границ Земли, отделяющей кору от верхней мантии, — границы Мохоровичича (Мохо). Эта граница была достойной целью для новой пневмопушки, к тому же, как и на других окраинных морях России, на Балтике существует экологический запрет на использование химических взрывов. Все это и предопределило решение о выборе района работ.

В то время еще не было известно, что литосфера под Балтикой позволяет регистрировать сигналы ПИ на расстояниях в сотни километров, и основное время экспедиции предпола-

[1] Научно-исследовательский проектный институт «Взрывгеофизика», где под руководством доктора технических наук М.И.Балашканда был разработан пневмоисточник.

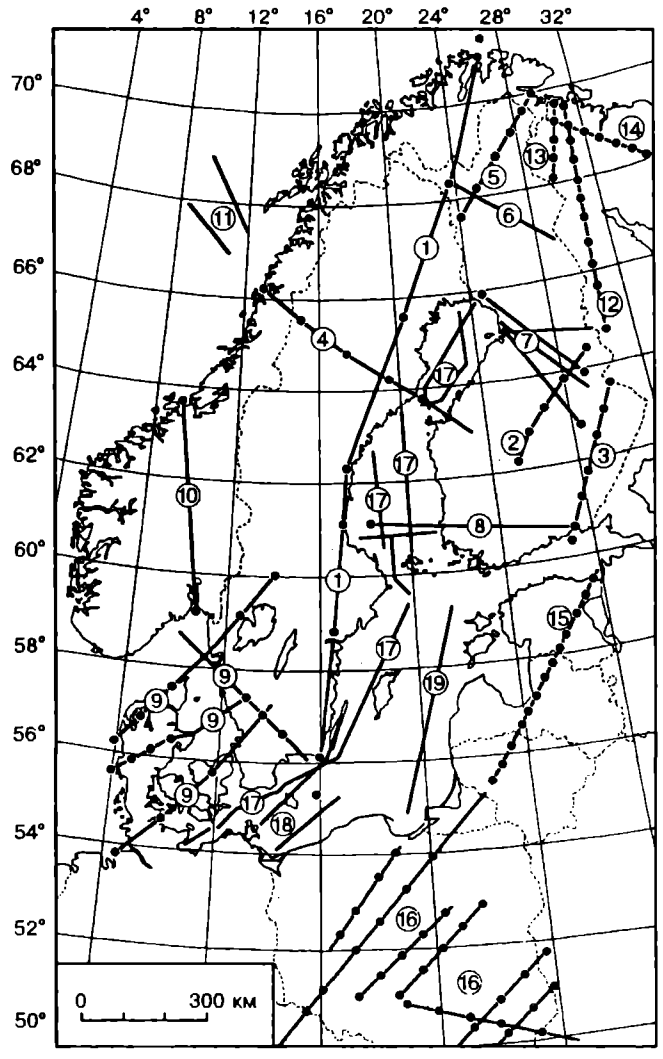


Рис.2. Профили ГСЗ в регионе, прилегающем к Балтийскому морю:
1. Фенноlора;
2. СВЕКА;
3. Балтик;
4. Блу роад;
5. ПОЛАР;
6. ФИНЛЭП;
7. Ботнические;
8. Силен-Порво;
9. ЮДЖИНО-S;
10. Транс-Скандинавиан;
11. Лофотенские;
12. Печенга-Костомукша;
13. Печенга-Ловно;
14. Никель-Умбозеро;
15. Советск-Кохтла-Ярве;
16. Польские;
17. БЭЙБЛ;
18. ТТЗ;
19. Балтийское море.

галось потратить на эксперименты по накоплению сейсмических сигналов, когда записи пневмоизлучений, проводимых в одной точке, суммируются для повышения дальности регистрации. Лишь в конце экспедиции планировался короткий профиль ГСЗ.

Подготовка экспедиции шла хорошо. Смущало только одно: финские коллеги не откликались на настойчивые предложения о совместном проведении эксперимента. Все прояснилось уже после начала рейса, при заходе в порт Хельсинки, когда расслабленные во время приема на судне финские ученые сообщили мне, что через два месяца на Балтике состоится большая западноевропейская экспедиция с похожими, но гораздо более широкими целями и возможностями. Экспедиция планировалась на одном из самых современных и дорогостоящих специальных сейсморазведочных судов «Минтроп». Проект назывался БЭЙБЛ, что в развернутом и переведенном с английского языка виде означает: «Эхо от литосферы на Балтике и под Ботническим заливом»[2]. Осторожные

[2] BABEL working group // Nature. 1990. V.348. № 6296. P.34—38; BABEL working group // Geophys. Res. Let. 1991. V.18. № 4. P.645—648.

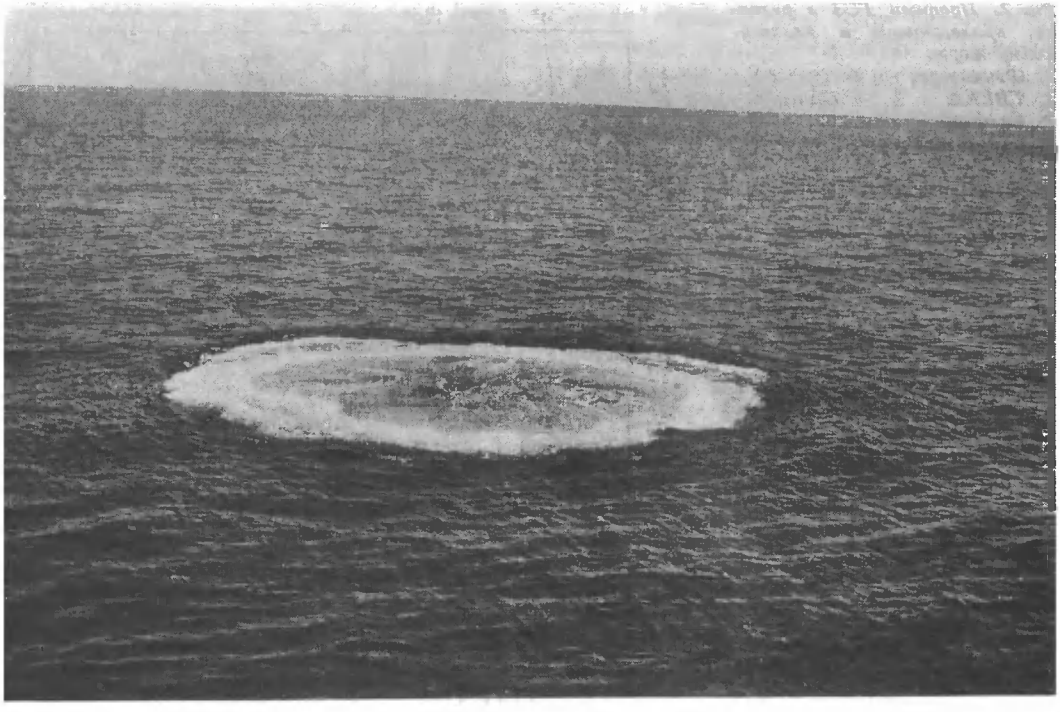


Рис.3. След пневмоизлучения на поверхности моря.

финны, сами участвуя в этом проекте, по-видимому, искренне предполагали, что наша экспедиция есть попытка перехватить инициативу у Запада (что-то вроде доставки грунта с Луны перед высадкой туда человека), и поэтому опасались идти на более тесное сотрудничество (о чем впоследствии жалели). Итак, неожиданно для меня, ничего не знавшего до того момента о проекте БЭЙБЛ, возникла некая ситуация конкуренции. К тому времени первые пробные записи сигналов нового ПИ уже продемонстрировали возможность регистрации одиночных (без накопления) пневмоизлучений на рекордных для моря расстояниях, превышающих 100 км. В связи с тем, что отступать некуда, а пневмопушка работала исправно, было решено несколько изменить план экспедиции и бросить все ее скромные силы на максимально длинный профиль ГСЗ, идущий от Калининградской области до территориальных вод Финляндии. Я срочно придумал и название профиля — Балтийское море (рис.2). Впоследствии оказалось, что в проекте БЭЙБЛ также был запланирован подобный (параллельный нашему) профиль (профиль БЭЙБЛ-В).

Надо сказать, что силы оказались неравными. Проект БЭЙБЛ стоил в 50—100 раз дороже нашего, так как использовал самую современную нефтеразведочную (инженерную и компьютерную) технологию. В этом проекте участвовали сотрудники 12 ведущих геофизических институтов и организаций Англии, Германии, Дании, Финляндии, Швеции и множество студентов, обслуживавших наземные пункты регистрации, расположенные по берегам Балтики и на островах. У нас же было лишь три донных сейсмографа (ДС), пневмоисточник (питаемый маломощным судовым компрессором) и всего по два комплекта батарей на каждый прибор. Тем не менее у нас были и преимущества. Первое — избыток (дешевого тогда) судового времени, второе — возможность применения

донных сейсмографов, позволяющая произвольно выбирать местоположение точек регистрации (мы могли получать данные в недоступных для сухопутных приемников местах). Так вот и появился профиль Балтийское море[3]. В связи с малым количеством сейсмографов он был простреляn дважды (немыслимая для Запада роскошь) при двух их различных расстановках (профили Балтийское море-1 и Балтийское море-2). Из-за малой мощности компрессора, не успевавшего накачивать ПИ, пневмоизлучения производились лишь один раз в 8 минут. По той же причине судно на профиле должно было двигаться с минимально возможной скоростью, что создавало массу трудностей для штурманов. Во время недельной работы на профиле мощные подводные пневмоизлучения (рис.3) привлекли к экспедиции международное внимание. Каждый день нас проведывали истребители шведских ВВС. Изредка прилетали и самолеты военно-морской разведки Германии.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ (ВТОРОЙ ЭТАП)

Итак, пять из шести постановок сейсмографов принесли результат. Забегая вперед, надо сказать, что благодаря тщательной работе наших инженеров записи донных сейсмографов (первичные материалы) по качеству оказались не хуже записей аналогичных западных сухопутных приборов. Во время экспедиции были достигнуты рекордные дальности регистрации пневмоизлучений и впервые на Балтике получены отражения сигналов ПИ от сейсмических границ, залегающих на глубинах 45 и 60 км.

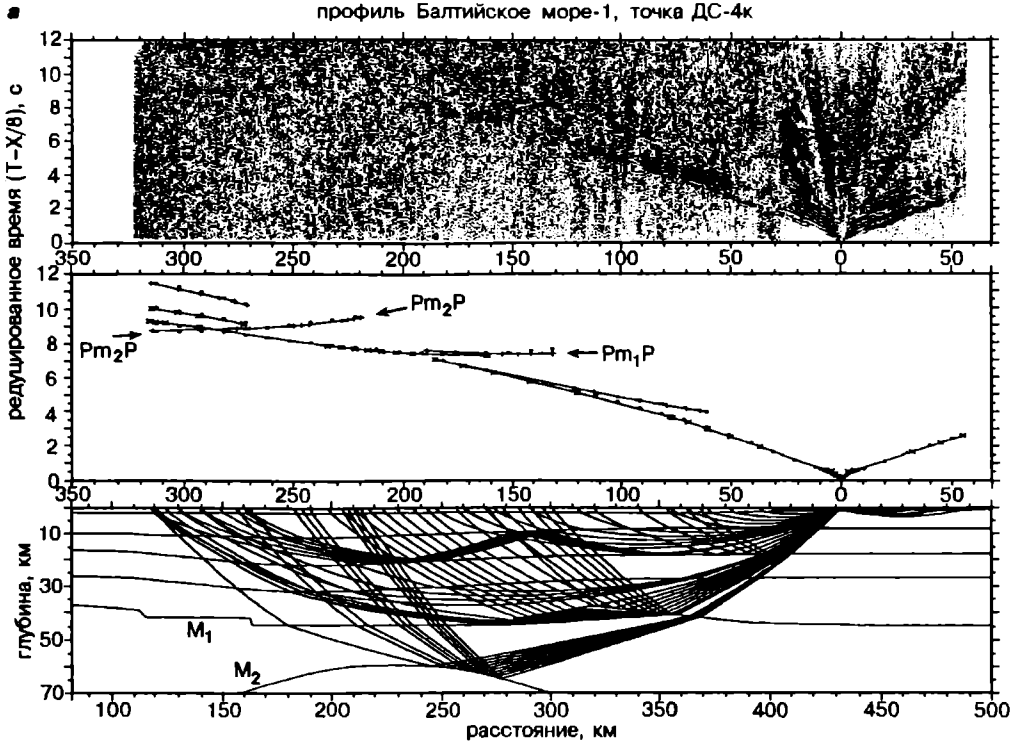
Далее предстоял длительный процесс обработки полученных данных, когда без современных компьютеров не обойтись. Для того чтобы привлечь внимание западных коллег к результатам профиля Балтийское море, нужно было хотя бы что-то обработать дома. Ввиду осложнения ситуации в науке и отсутствия помощников я остался с материалами один на один. За три месяца удалось получить первый сейсмический монтаж (вывести часть записей пневмоизлучений на бумаге). После этого я написал руководителям проекта БЭЙБЛ о том, что впервые (на два месяца раньше их) получены отражения сигналов ПИ от Мохо на Балтике (доставлен на Землю лунный грунт). Это, по-видимому, произвело небольшой переполох, так как к приоритету на Западе относятся серьезно. В результате мне предложили сделать доклад о полученных результатах на научной конференции в Копенгагене (апрель 1990 г.), где отчет о проекте БЭЙБЛ должен был произвести главный фурор. Так и случилось. Мой доклад смотрелся лишь как очень скромное приложение к впечатляющим результатам европейского проекта. Успокоившиеся западные коллеги предложили поддержать меня в конкурсе на получение гранта для обработки данных в Германии.

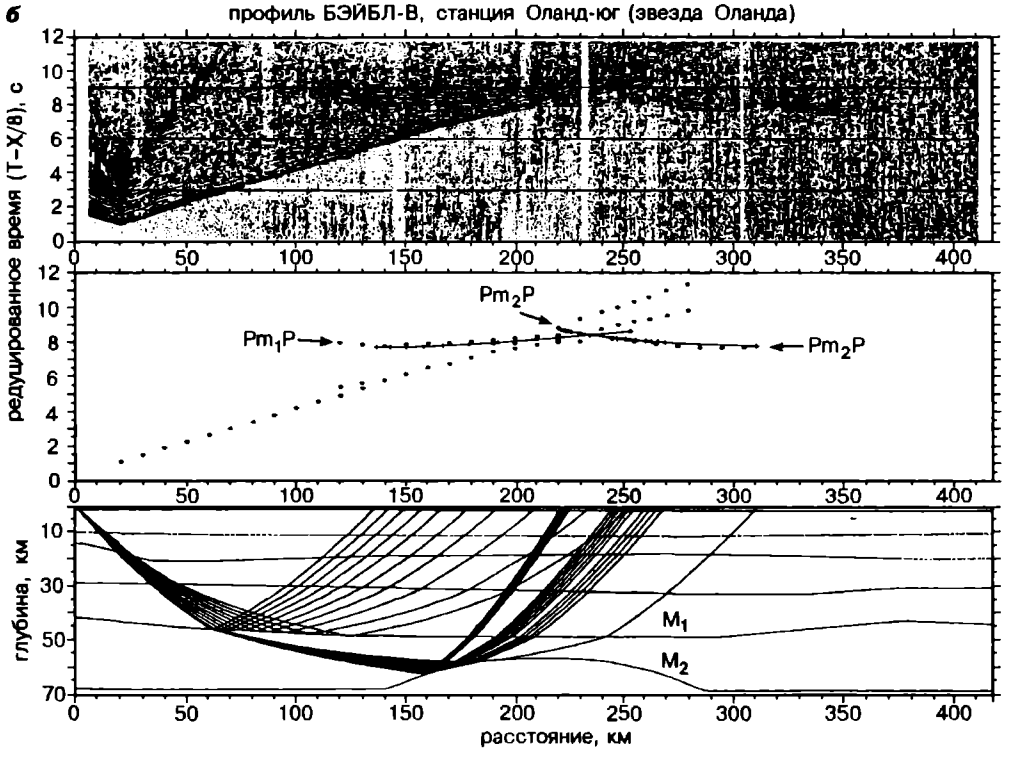
После возвращения домой началась предобработка первичных материалов. На медленных компьютерах лаборатории такая процедура заняла один год. Запомнилось одно потрясение: в разгар работ у меня из автомобиля был похищен «дипломат», где, среди прочего, находился бортовой журнал экспедиции. Это, однако, лишь задержало, но не остановило проект. Дело осложнилось и тем, что ревнивое лабораторное начальство попыталось отлучить меня от компьютера, мотивируя тем, что компьютер может от такой нагрузки сломаться. Пришлось работать тайно по вечерам.

Последующая работа с данными проводилась в Германии, в Центре морских геоисследований в г.Киле. За 18 месяцев интенсивной работы были обработаны и интерпретированы все имеющиеся по профилю Балтийское море материалы. Эти результаты и полученная сейсмическая модель были опубликованы[4] вскоре после моего

[3] Островский А.А. // Океанология. 1990. Т.30. С.693—695; Островский А.А. // Докл. АН. 1992. Т.327. № 1. С.74—78.

[4] Ostrovsky A.A., Flueh E.R., Luosto U. // Tectonophysics. 1994. V.233. P.279—292.


а
профиль Балтийское море-1, точка ДС-4к
редуцированное время (T–X/8), с
Pm2P
Pm2P
Pm1P
глубина, км
M1
M2
расстояние, км


б
профиль БЭЙБЛ-В, станция Оланд-юг (звезда Оланда)
редуцированное время (T–X/8), с
Pm2P
Pm1P
Pm2P
глубина, км
M1
M2
расстояние, км

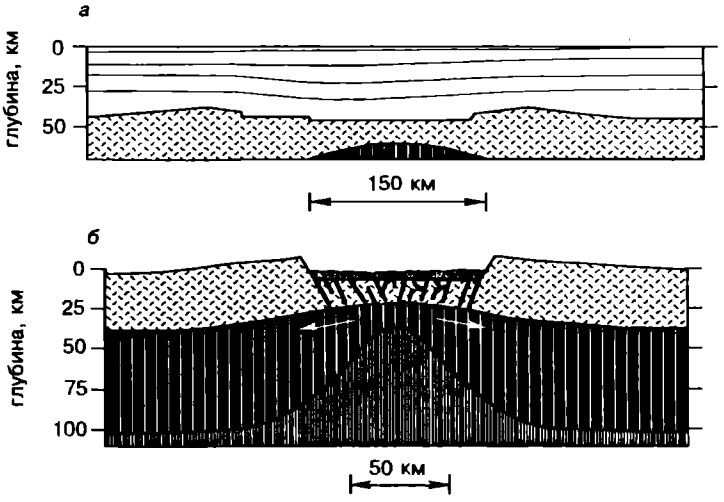


Рис.5. Усовершенствованная сейсмическая модель литосферы на профиле Балтийское море под центральной Балтикой (а) и схема зоны рифтообразования континентального типа (б). Геометрическое подобие сейсмических границ на модели и схеме показано одинаковой штриховкой соответствующих слоев.

возвращения в Москву в 1993 г. Здесь важно отметить, что соавтор с немецкой стороны (помогавший получить стипендию) в последний момент предложил изменить модель и убрать выявленные ступени Мохо, однако мне (уже вернувшемуся домой) удалось отстоять ее. Соавтор с финской стороны, существенно помогавший на этапе предобработки данных, не возражал против предложенной в статье модели.

Итак, двумерное моделирование (подбор сейсмических скоростей в модели литосферы, удовлетворяющих экспериментальным данным) выявило примечательное свойство границы Мохо (M_1) под центральной Балтикой: в середине профиля она опускается, достигая глубины 45 км. По обе стороны от понижения выделяются 2—3-километровые ступени и подъемы Мохо. Четкие отражения показали сейсмическую границу на глубине 60 км (M_2). Оказалось, что сейсмические скорости под границей Мохо меняются от 7.8 км/с (в районе депрессии) до 8.1 км/с (по обе стороны от нее). Специальные тесты были проведены во время моделирования для проверки точности модели. Оценка точности положения границы M_1 по глубине составляла ±1 км, по горизонтали — около 3 км.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ M_2 (ТРЕТИЙ ЭТАП РАБОТ — ВМЕСТЕ С МНФ)

В Москве после получения гранта МНФ была продолжена дальнейшая интерпретация данных профиля Балтийское море.

Еще в Германии, на записях сейсмостанций проекта БЭЙБЛ, я обнаружил вступления сейсмических волн, которые не были объяснены. В вышедшей к тому времени основной статье с результатами обработки данных профиля БЭЙБЛ-В отмечалось, что ее авторы тоже кое-где заметили отмеченные вступления[5], но вынуждены были оставить их без интерпретации (а зря!). Кроме того, они утверждали, что удалось опровергнуть результат шведского профиля Феннолора о существовании ступеней Мохо. Вот почему в Германии мне было предложено изменить полученную на профиле

Рис.4. Сводная сейсмограмма ГСЗ и годографы, полученные в результате двумерного сейсмического моделирования границ M_1 и M_2 для точки регистрации ДС-4к профиля Балтийское море-1 (а); то же для двумерного сейсмического моделирования границ M_1 и M_2 в точке регистрации OLS («звезда Оланда») профиля БЭЙБЛ-В (б). Обозначения сейсмических фаз: Pm_1P и Pm_2P — отражения Р-волн от границ M_1 и M_2 соответственно.

[5] BABEL working group // Geophys. J. Intern. 1993. V.112. № 3. P.325—343.

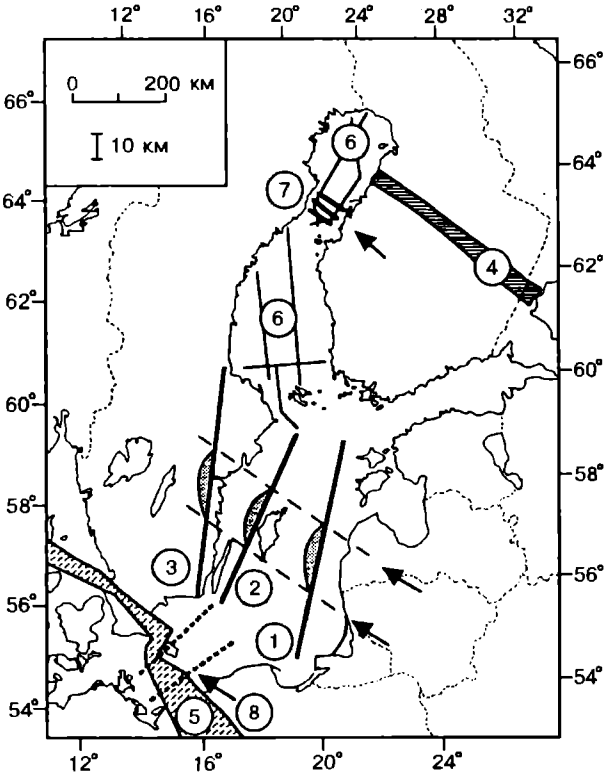


Рис.6. Профили Балтийское море, БЭЙБЛ-В, Феннолора, местоположение выявленной под центром Балтики границы M_2 и зон сжатия под Ботническим заливом и в районе о.Борнхольм. Цифрами обозначены:
1 — профиль Балтийское море и граница M_2;
2 — профиль БЭЙБЛ-В и граница M_2;
3 — профиль Феннолора и граница M_2;
4 — Ладожско-Ботническая зона;
5 — зона Торнквиста;
6 — профили проекта БЭЙБЛ в Ботническом заливе;
7 — изолинии глубин погружающихся слоев литосферы в зоне субдукции под Ботническим заливом;
8 — профили проекта ТТЗ и направление зоны сжатия.

Балтийское море модель, имеющую аналогичные ступени. Однако главный сюрприз был еще впереди.

На волновых полях профиля Балтийское море я также увидел не замеченные ранее вступления. Их удалось интерпретировать как отражения сейсмических волн от обнаруженной ранее границы M_2, расположенной под Мохо на глубине 60 км от поверхности Земли (рис.4,*а*). Однако теперь все данные свидетельствовали в пользу того, что M_2 имеет форму дуги. Вступления, обнаруженные на записях профиля БЭЙБЛ-В, также хорошо объяснялись наличием изогнутой вверх границы M_2! Для подтверждения этого я набрался смелости и частично переинтерпретировал профиль БЭЙБЛ-В (рис.4,*б*). На записях сейсмического профилирования БЭЙБЛ-В, полученных одновременно с записями ГСЗ, я также заметил проявление дугообразной границы M_2.

Таким образом, моделирование сейсмической границы M_2 показало, что она в дугообразном виде существует под обоими морскими профилями. К моей радости подобная граница существовала и под сухопутным профилем Феннолора, пересекающим Швецию в северо-восточном направлении[6]! Все три профиля указывали на существование некой неизвестной ранее зоны (или пояса), пересекающей Балтику в юго-восточном направлении. Она могла бы быть выявлена исследователями группы БЭЙБЛ уже по двум профилям (Феннолора и БЭЙБЛ-В) в случае, если бы они не пытались опровергнуть данные интерпретации формы M_1 на профиле Феннолора и провели бы правильную интерпретацию границы M_2 на профиле БЭЙБЛ-В.

[6] Guggisberg B., Berthelsen A. // Terra Cognita. 1987. V.7. P.631—638.

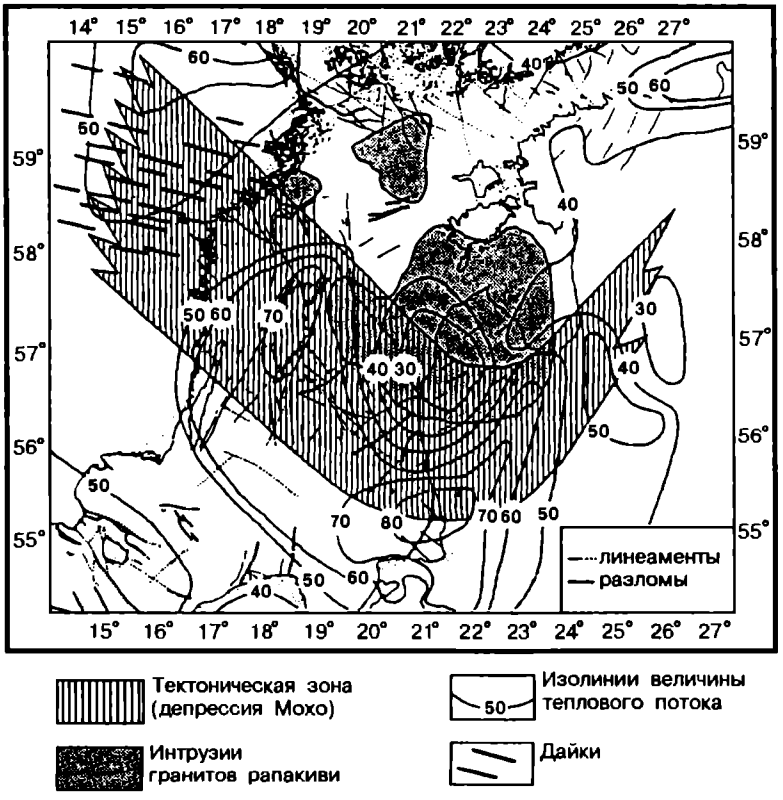


Рис. 7. Местоположение новой тектонической зоны под центром Балтики, тепловой поток и локальные геологические структуры.

Сразу же возник вопрос о природе новой зоны. Необходимо было предложить вариант, объясняющий ее происхождение. Похоже, что время ее формирования — протерозой (2—1 млрд лет назад), так как последний миллиард лет Балтийский щит сильно не менялся (оставался тектонически спокойным). Присутствие в зоне особых гранитов (рапакиви) позволяет оценить возраст ее образования более точно — 1.5 млрд лет назад.

Геометрическая форма выявленных границ (рис.5) подобна тем структурам, которые возникают в земной коре континентов при растяжении и образовании линейных прогибов (рифтов). Вот почему первая мысль была о рифтовой природе новой зоны[7]. Такое растяжение могло быть одной из причин возникновения зон сжатия, обнаруженных недавно под Ботническим заливом и в районе о.Борнхольм[8], тем более что ось новой зоны параллельна этим зонам сжатия (рис.6). Смущало лишь то, что рифт образовался под покровом мощной геологической толщи в 45 км. Это было очень необычно и не могло не вызвать возражений. Тем не менее в качестве предварительного объяснения гипотеза годилась, и я решил доложить о выявленной зоне на конференции в Гамбурге[9] в апреле 1995 г. Как и следовало ожидать, сенсационный

[7] Островский А.А. // Докл. АН. 1995. Т.342. № 5. С.680—685.

[8] Makris J., Wang S.-R. // Zeitschrift geologisches Wissenschaft. 1994. V.22. № 1—2. P.47—54.

[9] Ostrovsky A.A. Evidence for the existence of an early Proterozoic rifting zone under the central part of the Baltic Sea // Abstr. XX General Assembly European Geophysical Society. V.13. Suppl. I. 1995. P.44.

характер доклада вызвал активный отклик аудитории. Она разделилась на две части. Первая группа (та, которая обрабатывала данные профиля БЭЙБЛ-В), поняв, что упустила прекрасную возможность выявить новый тектонический пояс, резко возражала. Среди возражений были очень полезные (основанные на здравых сомнениях) и бесполезные (основанные на эмоциях). Одна нервная дама выступила с противоречивым заявлением о том, что, во-первых, этого пояса не может быть, а во-вторых, что она и сама его недавно обнаружила. Другая часть аудитории сдержанно молчала (конкуренция!), но в фойе со мной стали чаще здороваться за руку, а представитель консорциума БИРПС, организовавший проект БЭЙБЛ, пригласил участвовать в аналогичном эксперименте на Каспийском море. Было приятно.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ (ЧЕТВЕРТЫЙ ЭТАП РАБОТ — ВМЕСТЕ С МНФ)

Следующим этапом работ, финансируемых продолжающимся грантом МНФ, было закрепление на завоеванных позициях и развитие полученных результатов. Идея уже была высказана, и возникла необходимость в активной рекламной кампании (приоритет дело серьезное). Я заявил свой доклад на всевозможных научных конференциях, где (опять же иногда с помощью МНФ) успешно расширял круг проинформированных коллег.

При этом нельзя было забывать и о научном развитии идеи. Дальнейший анализ местных геологических и геофизических данных (известных из публикаций) подтвердил присутствие выявленной зоны. Сначала, к немалому моему удовольствию, оказалось, что она проявляется и в локальной аномалии теплового потока[10]: местоположение новой тектонической зоны в точности соответствует изолиниям положительной аномалии теплового потока в центральной части Балтийского моря (рис.7).

Потом оказалось, что эта тектоническая зона проявляется и в гравиметрических наблюдениях: форма изолиний гравитационного поля Земли в центральной Балтике повторяет форму депрессии Мохо[11].

Существование зоны хорошо согласуется и с геологическими данными (см. рис.7): наличием под поверхностью северо-восточной части центральной Балтики следов излияния гранитов рапакиви и многочисленных даек (застывших глубинных расплавов) на восточном побережье Швеции[12].

Азимут выявленного тектонического пояса совпал с выделенным направлением для всей Скандинавии, с азимутами других тектонических структур региона: зоны Торнквиста-Тейссейре, Ладожско-Ботнической зоны, Ландсортской впадины и некоторых глубинных и приповерхностных разломов в центре Балтики (см. рис.7). Это указывало на то, что обнаруженный пояс может быть одним из связующих звеньев для таких структур.

Тектоническая же интерпретация не получалась. Дело в том, что в обнаруженной зоне присутствуют не только черты растяжения (геометрия сейсмических границ, повышенный тепловой поток, дайки и интрузии гранитов рапакиви), но и черты сжатия (утолщение земной коры). Дискуссии после докладов привели к новому варианту интерпретации. Возможно, что зона — реликт древней континентальной окраины. В таких объектах наряду со сжатием присутствует и растяжение (задуговый рифтогенез). Действительно, выявленная тектоническая зона лежит несколько севернее

[10] Geothermal Atlas of Europe / E.Hurtig, V.Cermak, R.Haenel, V.I.Zui (editors). Gotha, 1992.

[11] Haxby W.F. Gravity Field of the Warld's Oceans // Portrayal of Girded Geophysical Data Derived from SEASTAT radar altimeter measurements of the shape of the ocean surface lamont-Doherty geological observatory of Columbia university. Palisades, 1987.

[12] Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area, 1:1 mill. / T.Koistinen (editor). Geological Survey of Finland. Espoo, 1994.

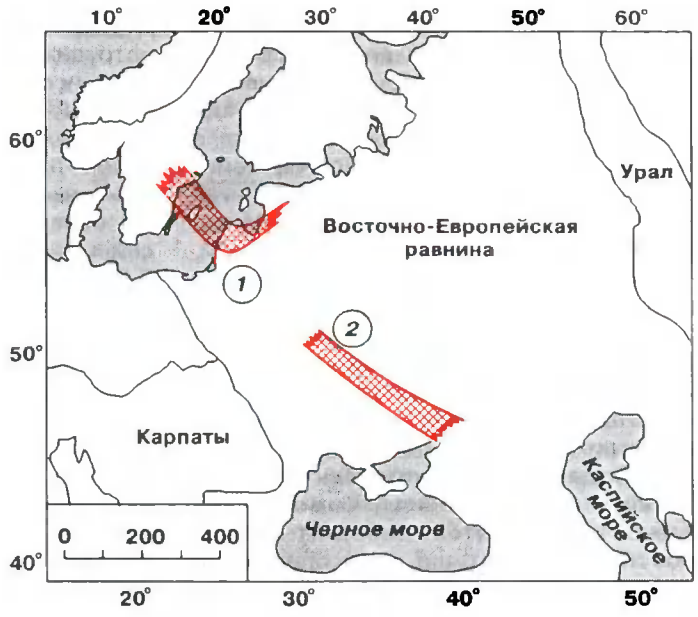


Рис.8. Местоположение новой тектонической зоны (1) и Днепровско-Донецкого палеорифта (2).

района, где входит в Балтику Трансскандинавский магматический пояс (граница раздела внутри Свекофеннской геотектонической провинции). Эта граница рассматривается некоторыми исследователями как реликт древней континентальной окраины. Таким образом, черты сжатия скорее всего — следствие аккреционных процессов (задавливания коры в глубь Земли), а данные о структурах растяжения, по всей вероятности, выявили обычно существующий там задуговый рифтогенный процесс.

По ходу анализа уже имеющихся результатов возникли экзотические (и не доказанные пока) гипотезы о возможной связи новой зоны с Днепровско-Донецким палеорифтом. Действительно, нетрудно было заметить, что она лежит на одной линии с известным Днепровско-Донецким палеорифтом (авлакогеном), формирование которого началось в позднем протерозое, т.е. приблизительно в то же время, что и рифтогенез в исследуемой здесь зоне (рис.8). Возможно, что два рифта — реликты одного и того же тектонического пояса, претерпевшего разрыв в районе Белоруссии. Ориентация и протяжение этой древней зоны растяжения земной коры приблизительно соответствует азимуту зоны Торнквиста-Тейсейре, простираясь от Балтийского моря до Азовского.

Другая гипотеза увязывает новую зону с формой о.Готланд. Ширина депрессии M_1 совпадает с длиной лежащего над ней Готланда, указывая на то, что геометрия острова, образованного кораллами много миллионов лет спустя после начала формирования зоны, возможно, подвергалась влиянию тектонических процессов, в разное время происходивших в границах рассматриваемого пояса.

* * *

Мне хотелось быть максимально понятным и занимательным для читателей. Возможно, кто-то из начинающих исследователей и увлечется этой темой, хотя я не слишком оптимистично оцениваю перспективы метода ГСЗ. Применение его всегда требует много времени, больших усилий и материальных затрат. Являясь фундаментальными исследованиями, такие работы

проводятся лишь странами, решившими свои более насущные проблемы. С другой стороны, эпоха великих географических открытий сейчас переместилась под поверхность Земли, туда, где находятся оставшиеся белые пятна в расположении Мохо или других сейсмических границ. Обнаружение неизвестных ранее черт строения Мохо, проявившихся на поверхности Земли, — нечастая удача. Впрочем, хочется предостеречь начинающих исследователей от чрезмерных надежд на везение, ибо, как говорят англичане: «Удача отдает предпочтение лишь подготовленным умам». Однако и без удачи никак нельзя.

В дальнейшем хотелось бы продолжить исследования. Сам я уже давно увлечен этой работой. Она — мое любимое детище, что, однако, не мешает мне пытаться соблюдать объективность в ее оценках. Несмотря на неоднозначность тектонической интерпретации, факт существования новой зоны невозможно опровергнуть. Со временем в этом будет убеждаться все большее число исследователей. Уже сейчас (и не случайно) работы западноевропейского проекта ЕВРОПРОБА идут на профиле, совпадающем с осью открытого пояса, а после доклада в Институте сейсмологии Университета Хельсинки известный в Европе ученый профессор Корхонен заявил, что теперь на тектонической карте Балтийского щита появилась новая зона — зона Островского. Было приятно.

В заключение хочется поблагодарить всех нынешних и бывших сотрудников лаборатории сейсмических исследований земной коры и верхней мантии под океанами Института океанологии РАН, а также сотрудников других организаций, принимавших участие в эксперименте с донными сейсмографами и пневматическими сейсмоисточниками на Балтике: Б.В.Холопова, Н.Н.Кичина, В.А.Орехова, Д.Б.Сапсовича и А.А.Буровкина. Оцифровка записей донных сейсмографов проводилась на установке, собранной и налаженной В.В.Баснаком.

Я признателен за помощь в организации экспедиции В.В.Седову и Г.А.Семенову, капитану А.Б.Валихову и команде 23-го рейса НИС «Профессор Штокман», терпеливо сносивших подпрыгивания судна при пневмоизлучениях.

Я искренне благодарен всем своим российским и западным коллегам, поддерживавшим меня во время работы по проекту, и своим научным оппонентам, ибо здравая критика, хотя и неприятна подчас, но зато повышает качество научных результатов.

На разных этапах исследования финансировались Фондом им.Александра фон Гумбольдта (Германия), Международным научным фондом и Российским фондом фундаментальных исследований. Ясно, что без поддержки этих организаций мне не удалось бы получить изложенные здесь результаты. Я благодарен им и их спонсорам.

Хроматомембранный массообменный процесс

Идея и ее практическое воплощение

Л. Н. Москвин

Леонид Николаевич Москвин, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой аналитической химии Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов — методы разделения веществ в радио- и аналитической химии, методы анализа в потоке, химические технологии в атомной энергетике.

В ЛЮБОЙ сфере человеческой деятельности, будь то обеспечение нормального протекания технологического процесса или защита окружающей среды, мы сталкиваемся с методами аналитического контроля. Еще 20—30 лет назад нас удовлетворяла возможность определять содержания веществ на уровне *ppm* (*part par million*) — одной части на миллион частей контролируемой среды. Эта величина поражает воображение. Ситуация равносильна поиску одного злоумышленника в городе с миллионным населением. Сегодня сплошь и рядом необходимо обнаруживать примеси на уровне долей части на миллиард (*ppb*). Одного-двух злоумышленников приходится искать среди всего человечества, населяющего земной шар. Обозначенные на будущее требования к пределам чувствительности аналитических методов — одна часть на триллион (*ppt*) — уже просто не поддаются образным сравнениям.

Подобные перспективы не пугают аналитиков, когда речь идет о периодическом контроле. Если не ограничено время на проведение анализа, соответствующие решения, как правило, могут быть найдены на базе уже известных методов. Но все чаще возникают ситуации, в которых нельзя не считаться с временными затратами. Представим себе, сколько вредных веществ успеет попасть в окружающую среду, если мы узнаем о появлении нежелательных примесей в сточных водах или в газовоздушных выбросах промышленных предприятий не в мо-

© Л.Н.Москвин

мент начала выброса, а спустя длительный период, определяемый регламентом отбора пробы и временем, необходимым для доставки ее в лабораторию и проведения анализа. В этих случаях нет альтернативы созданию легко автоматизируемых методов экспресс-анализа, в идеале непрерывного, непосредственно в потоке контролируемой среды. Именно здесь пересекаются трудно совместимые требования к низким пределам обнаружения примесей и к минимальным затратам времени на проведение анализа.

Несмотря на существенный прогресс в создании проточных детекторов, их чувствительность и селективность, как правило, недостаточны для непосредственного определения примесей в контролируемой среде. В системах непрерывного контроля в потоке необходимо объединять операции концентрирования, выделения и определения веществ. Подавляющее большинство методов разделения и концентрирования веществ основаны на различиях в их распределении между двумя фазами, находящимися в твердом, жидком или газообразном состоянии. К настоящему времени в этих методах апробированы все возможные сочетания фаз в различных агрегатных состояниях. Неизменными остаются принципиальные схемы реализации процессов межфазного распределения: смешение и разделение фаз или создание потока одной фазы относительно другой, неподвижной. За редкими исключениями любая из этих схем, независимо от используемой системы фаз, позволяет провести разделение при периодическом вводе исходной смеси веществ и периодическом выводе конечных продуктов.

Первая попытка выйти за рамки традиционных дискретных схем осуществления межфазного распределения была предпринята еще в 1949 г. лауреатом Нобелевской премии А.Мартином[1]. Он высказал идею реализации непрерывного двухмерного хроматографического процесса, сущность которого заключалась в непрерывном перемещении слоя сорбента перпендикулярно направлению потока смеси разделяемых веществ. Многочисленные попытки ее практического выполнения до сих пор значимыми успехами не увенчались[2].

Стало очевидным, что нужна принципиально новая идея осуществления межфазного обмена веществ в непрерывном режиме. Автор этих строк шел к ней около 20 лет, то полностью переключаясь на другие направления исследований, то снова возвращаясь к проблеме непрерывного разделения веществ. Когда решение было найдено, невольно возник вопрос: почему до этого никто раньше не додумался? Каждый бывалый автомобилист знает, что, если в бензин попала вода, достаточно взять кусок замши и профильтровать его. Замша проницаема для бензина и непроницаема для воды. А почему мы отдаем предпочтение изделиям из натуральной кожи, а не из всевозможных кожзаменителей? В кожаной куртке «тело дышит». Кожа пропускает влажный воздух, но задерживает влагу в виде дождя и снега. Самой природой созданы пористые среды, проницаемые только для газов и органических соединений с неполярными молекулами, смесь которых, в частности, представляет собой бензин. Но достаточно, чтобы в коже появились едва заметные трещины, и кожаная куртка не спасет нас от дождя.

Эврика! Чтобы реализовать межфазный обмен между потоками двух несмешивающихся жидкостей или газа и полярной жидкости, такой как вода или водные растворы, необходимо создать специальный, не смачиваемый водой, пористый материал с двумя типами пор, которые различаются размерами. Одни из них должны имитировать микропоры в коже, обеспечивающие ее проницаемость для

[1] Martin A.J.P. // Discuss. Faraday Soc. 1949. V.7. P.332—333.

[2] Москвин Л.Н., Царицына Л.Г. Методы разделения и концентрирования в аналитической химии. Л., 1991. С.117—126.

газов и неполярных жидкостей, другие должны быть существенно большими, чтобы по ним, как по трещинам в коже, могла беспрепятственно проникать вода или водные растворы.

Проницаемость пористых сред для жидкостей и газов подчиняется строгим физико-химическим законам. В порах возникает капиллярное давление, величина которого определяется их радиусом, а также свойствами поверхности пористого материала и контактирующей с ним жидкости. Если жидкость смачивает поверхность, величина капиллярного давления имеет положительный знак, т.е. оно способствует проникновению таких жидкостей в поры. И наоборот, для несмачивающих жидкостей величина капиллярного давления отрицательна, и оно препятствует их проникновению в поры. В пористых материалах, не смачиваемых водой и другими полярными жидкостями, поры остаются свободными для прохождения потока газа или неполярной жидкости. При выборе пористых материалов главные факторы — химическая стойкость и максимальные различия в проницаемости микропор для неполярных и полярных фаз. Этим требованиям в наибольшей степени отвечает политетрафторэтилен, известный многим по коммерческому названию «фторопласт-4».

Остается совсем немного — определить интервалы размеров пор, предпочтительных для создания потоков той и другой фазы. Когда выбираешь оптимальный диапазон радиусов микропор, способных пропускать потоки неполярных жидкостей и газов, приходится принимать во внимание две противоположные тенденции: чтобы в микропоры не попадала полярная жидкость, нужно увеличивать капиллярное давление, а значит, уменьшать радиус микропор. Но тогда пропорционально квадрату радиуса пор будет уменьшаться их проницаемость и для потоков неполярной жидкости или газа. Следовательно, нужно искать золотую середину. Оказалось, что оптимальный радиус микропор лежит в интервале 1—10 мкм. С макропорами все проще. Их размеры должны быть такими, чтобы возникающее в них капиллярное давление было столь малым, что не препятствовало бы прохождению полярной фазы. Для политетрафторэтилена нижняя граница радиусов макропор находится на уровне 100 мкм. При существенном увеличении их радиусов эффективность массообмена между потоками двух фаз снижается.

Итак, требования к пористой среде определены. Пористый политетрафторэтилен с двумя преимущественными типами пор, отвечающих этим требованиям, создан. Как же заставить потоки двух фаз двигаться через такую пористую матрицу одновременно, причем в разных направлениях? Схема процесса выглядит следующим образом. Чтобы полярная и неполярная фазы не смешивались, необходимо обеспечить разность давлений, под которыми они подаются в систему. Давление в пределах всего объема микропор, заполненных неполярной фазой, поддерживается меньшим, чем давление полярной фазы в макропорах. В результате газ или неполярная жидкая фаза не могут выйти из микропор в макропоры. В свою очередь их вытеснению из микропор полярной фазой препятствует капиллярное давление. Создание потока неполярной жидкой или газовой фазы через пористую матрицу под давлением, меньшим давления полярной фазы, осуществляется через не смачиваемые водой микропористые мембраны. Поскольку микропоры в этом случае недоступны для полярных фаз, появляется возможность ввода и вывода из пористой матрицы потока неполярной жидкой или газовой фазы.

Рассмотренный процесс получил название хроматомембранного[3]. Этот термин достаточно адекватно отражает его сущность. С мембранными методами такой процесс объединяют не только пористые мембраны, без кото-

[3] Москвин Л.Н. // Докл. АН. 1994. Т.334. № 5. С.599—602; Moskvin L.N. // J. Cromatogr. 1994. V.A669. P.81—87.

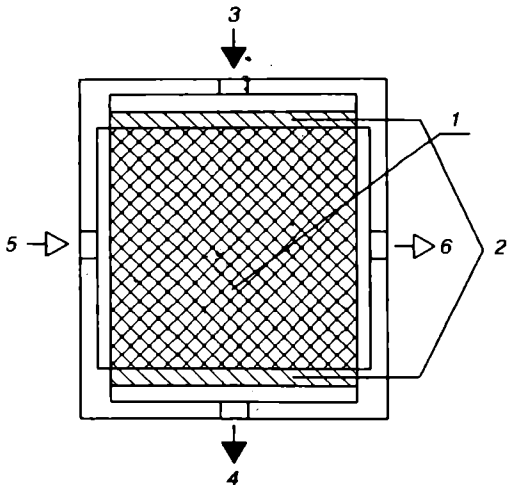


Схема хроматомембранного процесса. 1 — пористая гидрофобная матрица; 2 — микропористые мембраны; 3, 4 — вход и выход неполярной жидкой или газовой фазы; 5, 6 — вход и выход полярной жидкой фазы.

рых невозможно его осуществление. Их роднит и общая схема выделения веществ из одной фазы в другую. От хроматографических методов здесь заимствован механизм межфазного обмена — любое вещество, поступающее в пористую среду с потоком одной из фаз, многократно перераспределяется между обеими фазами. Различия проявляются в направлении движения зоны выделяемого вещества. В обычной хроматографии, когда одна из фаз неподвижна, такая зона движется в направлении потока подвижной фазы. В хроматомембранном процессе направление движения зоны и скорость ее перемещения определяются суммой векторов скоростей движения вещества в потоках обеих фаз.

Рассмотрим одну из возможных схем хроматомембранного процесса — выделение веществ из водных растворов в жидкий или газообразный экстрагент. Для упрощения схемы допустим, что зона вещества в хроматомембранной ячейке не размывается. Положению фронта зоны в стационарном состоянии соответствует прямая АВ. Режим работы ячейки зависит от соотношения скорости, с которой перемещается фронт зоны вещества с потоком водной фазы, и скорости движения экстрагента. Если для смещения фронта зоны вещества на расстояние, равное длине ячейки *l*, требуется больше времени, чем для смещения фронта в направлении движения экстрагента на величину, равную высоте ячейки *h*, вещество полностью извлекается экстрагентом. В противном случае реализуется режим стационарного насыщения экстрагента выделенным веществом.

На практике отличия от этой схемы связаны только с неизбежным размыванием фронта зоны выделяемого вещества. Обычно результирующая картина представляет собой три области. Первая соответствует режиму полного извлечения, вторая, промежуточная, — это область частичного извлечения или частичного насыщения (ее существование закономерно объясняется размыванием фронта зоны в реальном процессе), наконец, третья соответствует режиму предельного стационарного насыщения.

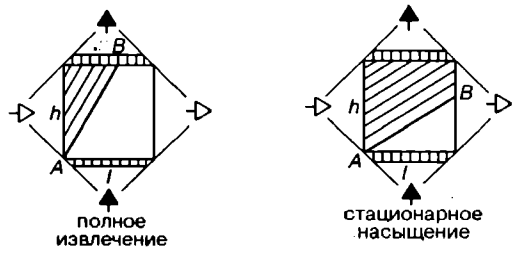
Где находят применение хроматомембранные процессы? Первое — это методы анализа в потоке. Хроматомембранные ячейки вписываются в схемы проточного анализа, не вызывая их существенного усложнения. В качестве иллюстрации можно рассмотреть схему непрерывного выделения двухвалентной меди[4]. Отклик детектора на каждом из прямолинейных участков строго пропорционален концентрации меди II в водной фазе, а коэффициент пропорциональности равен отношению скоростей потоков экстрагента и водного раствора. В тех случаях, когда возникает необходимость еще более низких пределов обнаружения примесей, целесообразен переход к дискретной схеме хроматомембранного процесса, при которой выделение осуществляется в условиях периодической остановки потока экстрагента, чтобы сконцентрировать примесь. В таком варианте удается обнаружить двухвалентную медь, концентрация ко-

[4] Moskvin L.N., Simon J. // Talanta. 1994. V.41. P.1765—1769.

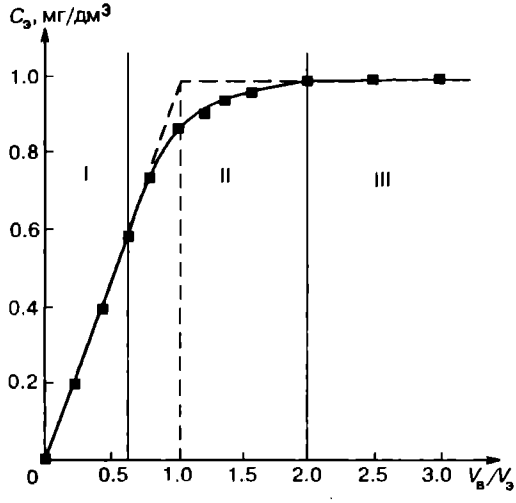
торой потрясающе мала — всего 0.1 ppb при времени концентрирования 1 мин. Если увеличивать время концентрирования, то предел обнаружения будет пропорционально снижаться. В этом проявляются принципиальные преимущества хроматомембранного предконцентрирования по сравнению с принятыми в настоящее время схемами экстракционного выделения в проточном анализе.

Хроматомембранное предконцентрирование позволило достигнуть рекордно низких пределов обнаружения таких распространенных загрязнителей природных вод, как поверхностно-активные вещества[5] и фенолы. Аналогичные методические решения оказались чрезвычайно эффективными при определении газообразных примесей в воздухе[6]. Во всех этих случаях используется режим полного извлечения. Режим стационарного насыщения при газовой экстракции дал новый импульс развитию методов газохроматографического определения органических загрязнителей в питьевой и природных водах[7].

Нельзя не отметить, что хроматомембранные методы не имеют видимых ограничений в масштабах осуществления процессов разделения веществ. В принципе любые массообменные процессы в системах жидкость—жидкость и жидкость—газ, используемые в химических и медицинских технологиях, могут быть реализованы по хроматомембранной схеме. Первые результаты в этом направлении мы получили при решении двух проблем: деоксигенации воды и водных растворов и оксигенации крови. Хроматомембранная технология очистки воды от растворенного кислорода позволила добиться его предельно низких содержаний[8]. Обратный процесс, примененный для насыщения



Положение фронта зоны выделяемого вещества в хроматомембранной ячейке (линия AB) в режиме полного извлечения в экстрагент и стационарного насыщения экстрагента (справа). Полые стрелки — вход и выход водной пробы; сплошные — вход и выход экстрагента.



Зависимость содержания ацетилена в газе-экстрагенте (Сэ) от соотношения скоростей потоков водной пробы и газа-экстрагента ($V_в/V_э$). Содержание ацетилена в водной пробе — 1 ppm. I — область полного извлечения; II — промежуточная область; III — область стационарного насыщения. Штриховыми линиями показаны экстраполированные прямолинейные участки, соответствующие областям стационарного насыщения и полного извлечения. Абсцисса точки их пересечения с большой точностью соответствует теоретической границе между этими областями.

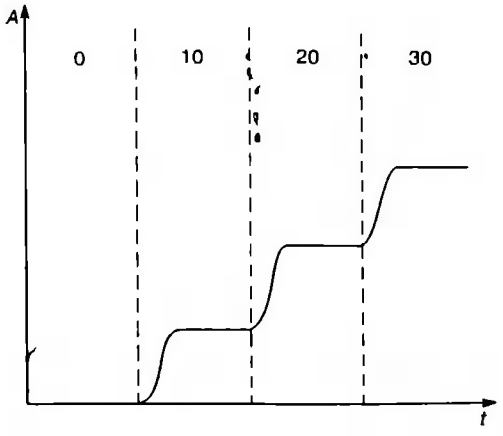
крови кислородом, может рассматриваться в качестве ближайшего аналога естественных массообменных процессов в легких. В экспериментах на донорской крови и в клинических испытаниях на собаках мы убедились в существенных преимуществах хроматомембранной оксигенации по сравне-

[5] Москвин Л.Н., Михайлова Н.В., Николаева Д.Н. // Журн. аналит. химии. 1996. Т.51. № 8. С.845—846.

[6] Москвин Л.Н., Родинков О.В., Катрузов А.Н. // Там же. С.835—844; Москвин Л.Н., Никаноров В.В. // Там же. С.891—895.

[7] Moskvin L.N., Rodinkov O.V. // J. Chromatogr. 1996. V.A725. P.351—360.

[8] Moskvin L.N., Rodinkov O.V., Katruzov A.N. et al. // Talanta. 1995. V.42. P.1707—1710.



Непрерывное определение меди II с хроматомембранным предконцентрированием. Числа указывают содержание Cu II (ppb) в анализируемом водном растворе.

нию с ранее известными способами обогащения крови кислородом и удаления из нее углекислого газа. Таким образом, есть все предпосылки для того, чтобы хроматомембранный процесс нашел практическое воплощение в новых медицинских технологиях.

Наконец, пора вспомнить об автоматизированных системах непрерывного контроля технологических процессов и объектов окружающей среды. В настоящее время уже созданы опытные образцы отечественных проточных анализаторов с хроматомембранными предконцентраторами, существенно превосходящих по своим аналитическим возможностям лучшие зарубежные аналоги. Эти анализаторы создаются для включения в аналитические комплексы патрульных экологических судов, предназначенных для мониторинга акваторий.

Представьте себе: судно движется по водоему, непрерывно отбирая пробу забортной воды. На экране дисплея вырисовываются кривые, отражающие содержание отдельных приоритетных загрязнителей, с указанием координат местности. Вдруг содержание одного или нескольких загрязнителей, на определение которых настроены проточные анализаторы, начинает расти и достигает предельно допустимых концентраций. Автоматически срабатывает система отбора контрольной пробы для последующего лабораторного анализа, а наблюдения продолжаются. В результате возникает контур потенциально опасной зоны и выявляется источник поступления загрязнителей в окружающую среду. Это — не фантастика, а реальность. Первый патрульный экологический катер сдан в опытную эксплуатацию и совершает рейды по Финскому заливу.

Проточные анализаторы с хроматомембранными предконцентраторами позволят существенно расширить спектр контролируемых загрязнителей природных вод с помощью судов подобного типа. Хочется надеяться, что это только первые шаги реализации хроматомембранного процесса.

Объявление

Базовая цена подписки (без доставки) на журнал «Природа» на 1-е полугодие 1998 г. снижена с 23 до 20 тыс. руб. за номер. Цена льготной подписки (в редакции и издательстве «Наука») определена в 16500 руб. за номер и 99000 руб. за полугодие (6 номеров).

Фотопереключаемые молекулярные устройства

С. П. Громов

Сергей Пантелеймонович Громов, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Института химической физики им. Н.Н.Семенова РАН. Область научных интересов — синтез, комплексообразование и супрамолекулярная органическая фотохимия краунсодержащих красителей.

НАИБОЛЕЕ совершенный «суперкомпьютер» — человеческий мозг — не содержит ни одной, даже самой простой интегральной микросхемы. Он состоит исключительно из органических молекул, которые образуют сложную архитектонику, способную думать и чувствовать. Разве не заманчива идея создать молекулярный компьютер, в котором диоды и транзисторы имеют размер обычной органической молекулы? Управлять таким компьютером удобно было бы с помощью света определенной длины волны. Для этого необходимы фоточувствительные соединения.

Фоточувствительные системы повсеместно встречаются в природе. Типичные примеры этого — фотосинтез растений и зрение животных. В этих системах свет выполняет роль пускового механизма, приводящего в действие целый ряд жизненно важных процессов.

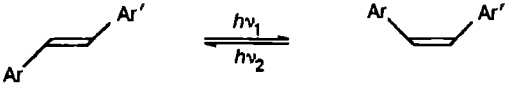
Для выполнения своих основных функций подобные фоточувствительные системы имеют антенну для поглощения фотона и дальнейшего превращения его энергии в структурные изменения молекулы, а также фрагмент, который вследствие этого может менять свою реакционную способность.

ИСКУССТВЕННЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Попытки искусственно создать фоточувствительные системы различной степени сложности, которые обла-

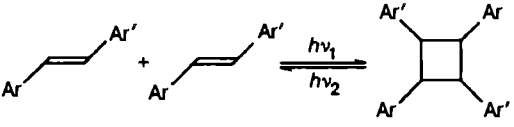
© С.П.Громов

дали бы наиболее ценными свойствами природных объектов, делаются давно. Среди них в настоящее время наиболее изучены соединения, содержащие в качестве фотоантенны N=N-связь, способную только к одному типу превращений под действием света — *транс-цис*-фотоизомеризации[1]. Для соединений, в которых роль фотоантенны выполняет C=C-связь (непредельные, или ненасыщенные соединения), тоже известна *транс-цис*-фотоизомеризация.



транс-изомер *цис*-изомер

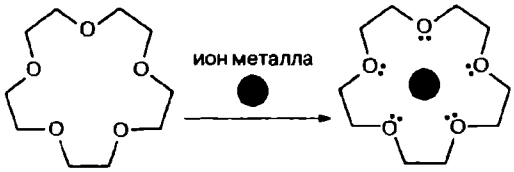
Однако для них обстоятельно исследованы и другие обратимые фотохимические (фотопереключаемые) реакции[2]. Это прежде всего реакция [2+2]-фотоциклоприсоединения с образованием производных циклобутана, т. е. соединений, содержащих четырехчленный цикл:



производное циклобутана

(здесь Ar и Ar′ — функциональные группы или фрагменты; $h\nu_1$ и $h\nu_2$ — фотоны). Использование обеих этих реакций дает значительно больше возможностей для построения сложных фоточувствительных систем.

В качестве фрагментов, чутко реагирующих на изменение структуры молекулы при фотопереключении, одними из наиболее перспективных считаются краун-эфиры. Помимо атомов углерода, из которых построен макроцикл, они имеют несколько атомов кислорода, способных отдавать свои неподеленные электронные пары на образование химических связей с ионами металлов.



краун-эфир комплекс

Соединения с такими свойствами называют комплексонами, а их производные с ионами металлов — комплексами[3].

Краун-эфиры достаточно широко используются в фоточувствительных системах, так как их способность к образованию комплексов сильно зависит от строения и пространственной структуры[4].

Наличие в молекуле C=C-связи и фрагмента краун-эфира позволяет сделать реакцию комплексообразования фотопереключаемой. Однако синтез таких соединений не был описан в литературе.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ФОТОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И ФОТОПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ УСТРОЙСТВА

В нашем институте в отделе фотохимии были впервые синтезированы и исследованы краунсодержащие непредельные красители (КНК), имеющие C=C-связь[5]. Это позволяет осуществлять фотопереключение молекул светом видимого диапазона. Можно было предположить, что в результате самосборки молекул КНК и солей металлов получатся сложные надмолекулярные структуры — так называемые

[1] Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия — масштабы и перспективы. Сер. Химия. М., 1989. № 2.

[2] Введение в фотохимию органических соединений / Под ред. Г.О.Беккера. Л., 1976.

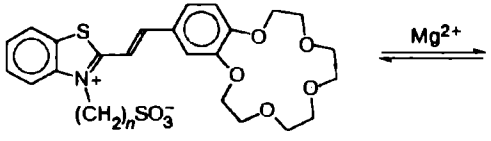
[3] Давыдова С.Л. Удивительные макроциклы. Л., 1989.

[4] Химия комплексов «гость—хозяин» / Под ред. Ф.Фегтле и Э.Вебера. М., 1988.

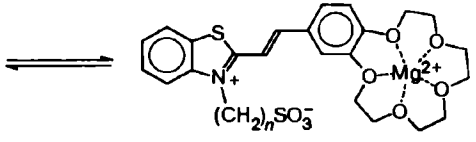
[5] Громов С.П., Федорова О.А., Фомина М.В., Алфимов М.В. 18(15)-Краун-6(5)-содержащие стириловые красители в качестве селективных реагентов на катионы аммония, щелочных или щелочно-земельных металлов и способ их получения // Патент РФ, № 2012574. БИ. 1994. № 9; Громов С.П., Фомина М.В., Алфимов М.В. // Изв. РАН. Сер. хим. 1993. № 9. С.1625—1633.

супрамолекулярные комплексы, также обладающие способностью к фотопереключению.

Действительно, было найдено, а затем подтверждено теоретическими расчетами, что среди полученных соединений наиболее перспективны для создания молекулярных фотопереключателей КНК с концевой «липкой» анионной группой SO_3^-. Это позволило впервые осуществить синтез наиболее простых представителей КНК и за счет самосборки получить из них и катионов металлов супрамолекулярные комплексы:

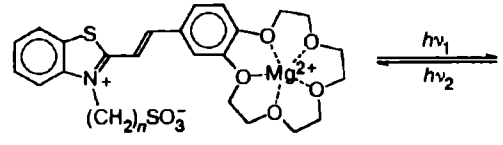


КНК

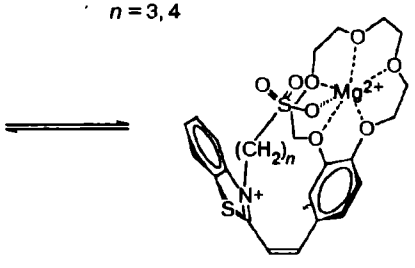


супрамолекулярный комплекс

Такие комплексы могут под действием света одной длины волны «надевать», а под действием света другой длины волны «снимать» свою анионную «шапочку» (группу SO_3^-), т.е. способны к молекулярному фотопереключению[6].



$n = 3, 4$



В исследованиях выяснилось, что *цис*-изомер КНК в 500 раз легче образует комплексы, чем *транс*-форма. Более того, с помощью света можно менять это сродство к катиону металла, т.е. управлять процессом образования комплекса.

Полученные КНК обладают высокой селективностью к различным катионам металлов. Так, *цис*-форма КНК не образует устойчивых комплексов с однозарядными катионами.

Только с катионами магния и кальция из всех двухзарядных катионов щелочноземельных металлов *транс*- и *цис*-формы КНК дают наиболее прочные комплексы. Такие супрамолекулярные комплексы из КНК открывают новые возможности для разработки и создания фоточувствительных систем более высокой степени сложности — молекулярных фотохимических и фотофизических устройств. Управлять такими устройствами можно, облучая их светом определенной длины волны.

Судя по данным рентгеноструктурного анализа и фотохимическим исследованиям, молекулы КНК в кристалле и в растворе в присутствии катионов металлов способны также к самоорганизации в пары по типу «голова к хвосту» так, что C=C-связи располагаются друг над другом. Если облучать растворы таких супрамолекулярных димерных комплексов, то происходит с высокой эффективностью [2+2]-фотоциклоприсоединение (рис.1).

В результате образуется единственный из 11 теоретически возможных изомеров циклобутана[7].

---

[6] Громов С.П., Федорова О.А., Ушаков Е.Н., Станиславский О.Б., Леднев И.К., Алфимов М.В. // Докл. АН СССР. 1991. Т.317. № 5. С.1134—1139; Barzykin A.V., Fox M.A., Ushakov E.N., Stanislavsky O.B., Gromov S.P., Fedorova O.A., Alfimov M.V. // J. Am. Chem. Soc. 1992. V.114. № 16. P.6381—6385.

[7] Алфимов М.В., Громов С.П., Станиславский О.Б., Ушаков Е.Н., Федорова О.А. // Изв. РАН. Сер. хим. 1993. № 8. С.1449—1453; Громов С.П., Ушаков Е.Н., Федорова О.А., Буевич А.В., Алфимов М.В. // Там же. 1996. № 3. С.693—700.

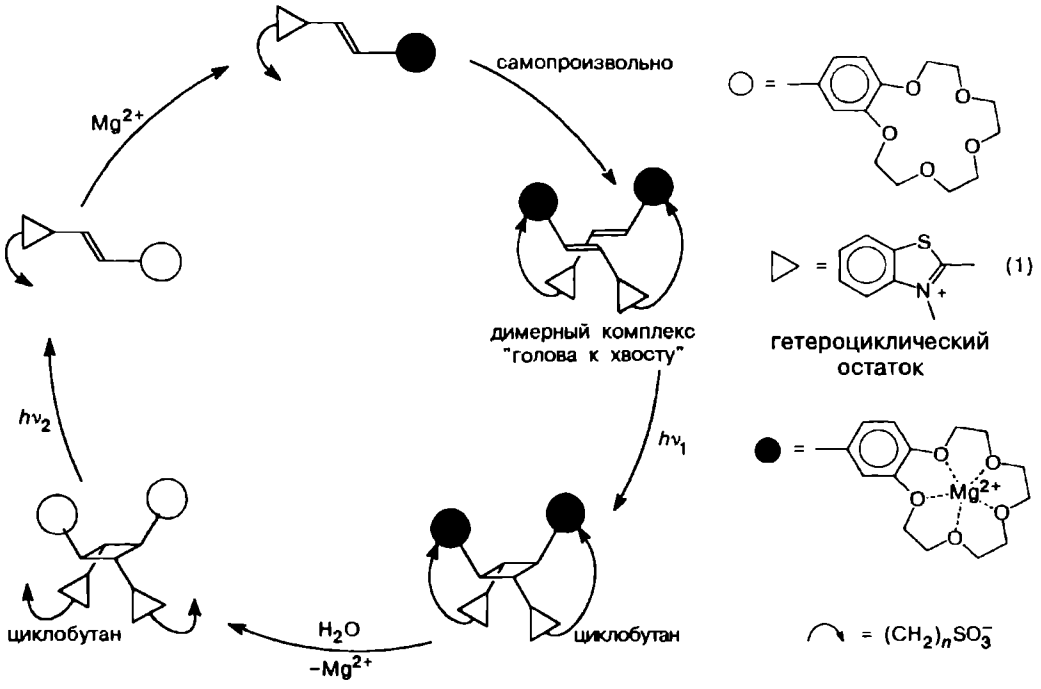


Рис.1. Цикл превращений КНК при комплексообразовании и облучении светом.

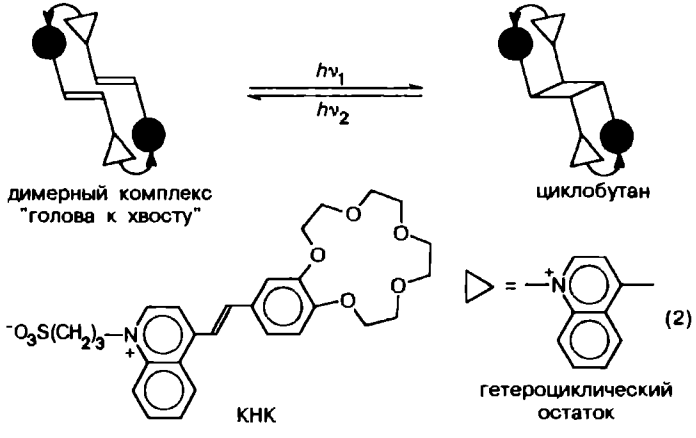


Рис.2. Димерный комплекс и циклобутан, образующиеся при использовании гетероциклического остатка (2).

Димеризация по типу «голова к хвосту» может давать различные результаты, поскольку зависит от строения гетероциклического остатка. Если в КНК содержится остаток (1), то самый устойчивый димерный комплекс тот, который изображен на рис.1. Наоборот, димерный комплекс такого строения с гетероциклическим остатком (2) неустойчив из-за пространственных затруднений (рис.2). В этом случае образуется другой димерный комплекс, тоже по типу «голова к хвосту». Он вступает в реакцию [2+2]-фотоциклоприсоединения с образованием также единственного изомера циклобутана, но иного строения, чем в предыдущем случае[8].

Облучение и тех и других производных циклобутана светом с более

[8] Громов С.П., Федорова О. А., Ушаков Е.Н., Буевич А.В., Алфимов М.В. // Изв. РАН. Сер. хим. 1995. № 11. С.2225—2230.

короткой длиной волны приводит к количественному образованию исходных КНК.

Следует отметить, что оба типа КНК не вступают в реакцию [2+2]-фотоциклоприсоединения, если отсутствуют соли таких металлов, как магний, кальций и барий. Это можно объяснить прежде всего кулоновским отталкиванием положительно заряженных фрагментов молекул, мешающим их пространственному сближению, и низкой реакционной способностью их C=C-связей.

Полученные в настоящее время данные позволяют утверждать, что катионы металлов в димерных комплексах КНК не взаимодействуют с C=C-связями реагирующих молекул и поэтому не могут непосредственно влиять на протекание реакции. По-видимому, катионы металлов выполняют роль «молекулярного клея», сближая молекулы на расстояния, на которых реакция уже возможна, и ориентируют C=C-связи так, чтобы они находились в одной плоскости и параллельно одна другой, т.е. наиболее благоприятным для реакции образом! Аналогичным способом, только в живой природе, пространственная структура белковой части ферментов способствует осуществлению ими катализа.

[2+2]-Фотоциклоприсоединение КНК, как и изученная нами *транс-цис*-фотоизомеризация, обладает высокой селективностью к различным катионам металлов. В присутствии солей магния и кальция собираются наиболее прочные димерные комплексы, и именно в них протекает эффективная реакция образования производных циклобутана. Интересно, что если взять соединения, в которых краун-эфирный фрагмент больше, т.е. содержит шесть атомов кислорода вместо пяти, то такие КНК в присутствии катионов кальция вступают в реакцию [2+2]-фотоциклоприсоединения, а в присутствии катионов магния не вступают.

Еще одно удивительное свойство реакции [2+2]-фотоциклоприсоединения комплексов КНК — ее уникальная стереоспецифичность, т.е. способность давать только один из многих возможных изомеров циклобутана. Такое свойство, очевидно, связано с тем, что КНК могут образовывать различные типы уже упомянутых супрамолекулярных димерных комплексов. Это позволяет целенаправленно создавать фотопереключаемые устройства строго определенного строения.

Краунсодержащие циклобутаны без ионов металла представляют собой новый тип фотопереключаемых комплексонов. В них оба краун-эфирные фрагмента расположены таким образом, что можно представить себе их одновременное участие в образовании комплексов (со структурой типа «сэндвича») с катионами металлов большого ионного радиуса (например с катионами бария и цезия) или с небольшими органическими катионами.

Таким образом, для создания фотопереключаемых устройств с заданными характеристиками из двух молекул КНК и двух катионов металлов можно собирать в растворе супрамолекулярные димерные комплексы; с помощью света определенной длины волны превращать их в краунсодержащие циклобутаны с уже иными способностями к образованию комплексов с теми же или другими металлами; вновь их разбирать (при необходимости) на исходные соединения с помощью света другой длины волны.

По-видимому, из таких или аналогичных фотопереключаемых молекулярных устройств могут быть построены фотоуправляемые системы еще более высокой степени сложности.

***

Конечно, от КНК до молекулярного компьютера еще очень далеко. Однако уже сейчас молекулярные фотопереключатели и фотопереклю-

чаемые устройства, созданные на их основе, могут быть, а некоторые уже оказались полезными в самых разных областях науки и техники: например, для диагностики ионов в загрязненной ими окружающей среде и в биологических жидкостях; при создании новых систем оптической записи информации, особенно с использованием фотопереключаемых полимерных пленок и монослоев из КНК (пленки Ленгмюра—Блоджетт); в молекулярной электронике; в качестве переносчиков катионов металлов в фотоуправляемом транспорте ионов через искусственные мембраны и мембраны живой клетки; в энергосберегающих экологически чистых технологиях очистки воды от примесей токсичных металлов с помощью солнечной энергии.

НОВОСТИ НАУКИ

Метеорология

Озонные дыры ставят новый рекорд?

Сезонно возникающая в заполярных районах Южного полушария озонная дыра образовалась в 1996 г. в сентябре, т.е. необычно рано, и сразу же охватила весьма обширное пространство. К этому моменту метеорологи британской антарктической станции «Фарадей» (недавно переданной украинским полярникам и ныне носящей имя В.И.Вернадского) уже зарегистрировали рекордно низкий для августа любого года уровень концентрации атмосферного озона. Аргентинские специалисты в том же месяце зафиксировали на высокоширотном о.Огненная Земля 35-процентное истощение озона, ранее отмечавшееся лишь в сентябре, когда озонные дыры обычно достигают максимума. Около 20 сентября на британской южнополярной станции «Холли-Бей» (залив Галлея) содержание озона в атмосфере опустилось до 130 ед. Добсона, тогда как ранее в аналогичный период оно, как правило, оставалось в пределах 350—400 ед. Добсона.

Интересно отметить, что все эти показатели близки к тем, которые еще в первых числах сентября 1996 г. прогнозировал озонометрист Д.Хоффман (D.Hoffmann; Национальное управление США по изучению океана и атмосферы). Он указывал, что углубление озонных дыр обычно наступает каждый второй год. Подобная цикличность, по его мнению, вызывается естественными колебаниями в движении воздушных масс Южного полушария: именно они приносят с севера большие «дозы» химических веществ, способных активно разрушать молекулы озона. С учетом роста общего содержания таких веществ в верхних слоях воздушной оболочки Земли это, считает Хоффман, и должно было привести к возникновению в конце сентября — начале октября 1996 г. весьма глубокой озонной дыры.

Не все метеорологи разделяют убеждение, что 1996 г. окажется в данном смысле исключительным. Так, Дж.Шанклин (J.Shanklin; Британское антарктическое управление) полагает, что сентябрьские данные могут быть связаны с не совсем обычной метеообстановкой, приведшей к нехарактерному перемещению воронки холодного воздуха, в пределах которой и осуществляется преимущественно массовое разрушение молекул озона. В 1996 г. эта воронка сместилась в сторону Южной Америки, поэтому разрушение озона началось раньше и в более северной области (над о.Огненная Земля), чем обычно. Но это не обязательно означает, что озонная дыра станет рекордной по размерам и интенсивности.

New Scientist. 1996. V. 151. № 2949. P.6 (Великобритания).

Сверхсшитый полистирол: чужой среди своих

В. А. Даванков, М. П. Цюрупа, А. В. Пастухов, Л. А. Маслова, М. М. Ильин, Л. А. Павлова, А. И. Андреева, О. Г. Тарабаева

Вадим Александрович Даванков, доктор химических наук, профессор, заведующий Лабораторией стереохимии сорбционных процессов Института элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова РАН, член Американского химического общества. Лауреат Государственной премии (1996).

Мария Петровна Цюрупа, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник.

Александр Валерианович Пастухов, кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Лидия Андреевна Маслова, научный сотрудник.

Михаил Михайлович Ильин, кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Людмила Александровна Павлова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Алевтина Ивановна Андреева, младший научный сотрудник.

Ольга Геннадиевна Тарабаева, кандидат химических наук, научный сотрудник.

Сотрудники Лаборатории стереохимии сорбционных процессов Института элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова РАН. Верхний ряд: А.В.Пастухов, М.П.Цюрупа, В.А.Даванков; средний ряд: Л.А.Павлова, В.И.Евтеева, О.Г.Тарабаева; нижний ряд: А.В. Смаленкова, Л.А.Маслова, М.М.Ильин.

МИР ПОЛИМЕРОВ чрезвычайно многообразен. Если малые молекулы отличаются друг от друга числом и природой входящих в них атомов, последовательностью их соединения и расположением в пространстве, то объединение множества малых молекул в полимер открывает возможность еще и комбинировать разные по своей природе мономерные звенья и создавать на этой основе так называемые сополимеры и пространственные структуры различной сложности. Многообразие таких пространственных конструкций поражает умы ученых, исследующих природные сополимеры — белки, полисахариды и гликопротеиды. Синтетическая же полимерная химия еще только начинает задумываться над созданием макромолекул более сложной конфигурации, чем примитивные клубок, глобула и стержень, характерные для длинных линейных макромолекул, или простейшая пространственная сетка, хорошо изученная на примере резин и ионообменных смол.

Логика познания ведет от простого к сложному, и только глубокое понимание основных свойств базовых материалов и закономерностей их превращений позволяет осознанно подойти к созданию более сложных конструкций и процессов.

К таким базовым материалам в полимерной химии принадлежит полистирол. Он был открыт в Германии еще в 1839 г. и начал производиться там с 1920 г. Чего только не изготовляют из полистирола! Это — авторучки, кассеты, осветительная арматура, пленки для конденсаторов, упаковки. Широко известен пенополистирол — замечательный теплоизолирующий материал.

Длинные макромолекулы полистирола достаточно гибки и, растворяясь в таких

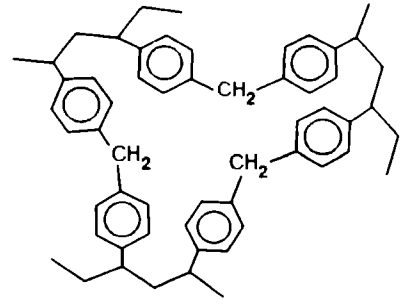
© В.А.Даванков, М.П.Цюрупа, А.В.Пастухов, Л.А.Маслова, М.М.Ильин, Л.А.Павлова, А.И.Андреева, О.Г.Тарабаева

органических средах, как толуол или дихлорэтан, принимают конформацию рыхлого клубка. Если между макромолекулами полистирола перекинуть сшивающие мостики, то получается пространственная сетка. Такой материал уже нерастворим, но набухает, увеличивая свой объем, в тех жидкостях, в которых растворяется исходный линейный полистирол. Напротив, в метаноле, гексане или воде, в которых линейный полистирол нерастворим, не набухают и его трехмерные сополимеры. Хорошо известна тенденция к снижению способности набухать при увеличении степени сшивания сополимера. Так, например, если в сополимере стирола с дивинилбензолом доля дивинилбензола увеличивается процентов до 20, то материал становится жестким, ненабухающим, практически не деформируемым под нагрузкой.

Это классика, азы полимерной химии, приведшие к догме, гласящей, что межмолекулярные сшивки уплотняют полимерный материал. Эта догма подтверждалась и переходом от резины к жесткой гуттаперче при увеличении степени сшивки, и всей практикой создания часто сшитых эпоксидных полимеров.

Природа, однако, гораздо богаче самых совершенных теорий, и сшивки, оказывается, могут не уплотнять, а, наоборот, разрыхлять полимерную сетку. Все зависит от того, каково взаимное расположение цепей и узлов сетки в пространстве (т.е. топология сетки), какова природа сшивок и в каких условиях они возникли между полимерными цепями.

Авторы данной работы создали сверхсшитый полистирол[1]. В нем почти каждое мономерное звено полистирола вовлечено в образование одного, а то и



Структура сверхсшитого полистирола.

двух межмолекулярных мостиков, а материал тем не менее имеет низкую плотность, легко деформируется и сильно набухает в любых (не только «хороших»!) жидкостях. Это не укладывается в рамки никаких современных теорий, но легко может быть понято, если отказаться от догм и руководствоваться соображениями элементарной логики. Как показывает практика, приверженцы классической полимерной химии не всегда способны совершить этот простой шаг.

Зададимся вопросом: какова роль межмолекулярных мостиков в полимерной сетке? Она вполне очевидна: связывая две полимерные цепи, мостик лишает их независимости, не дает им разойтись в пространстве под воздействием механического усилия или вклинивающихся между цепями молекул растворителя. Следующий вопрос: как влияют мостики на поведение всего материала в целом? Оказывается, этот вопрос не может иметь однозначного ответа без рассмотрения условий получения сетки и ее топологии, т.е. взаимного расположения полимерных цепей в пространстве.

Да, сшивки уплотняют материал, если они введены в систему, не содержащую ничего, кроме полимера. Именно таким классическим путем получают сополимеры стирола с дивинилбензолом, когда весь объем исходных мономеров количественно превращается в единый блок сополимера. Дивинилбензол, включаясь своими двумя винильными группами в две растущие полистирольные цепи, связывает их узлом сшивки, что создает в сополимере единую пространственную сетку. Она представляет собой совокупность взаимосвязанных ячеек, отличаю-

[1] Подробнее см., напр.: Tsyurupa M.P., Maslova L.A., Andreeva A.I., Mrachkovskaya T.A., Davankov V.A. // Reactive Polymers. 1995. V.25. P.69–78; Tsyurupa M.P., Ilyin M.M., Andreeva A.I., Davankov V.A. // Fresenius J. Anal. Chem. 1995. V.352. P.672–675; Цюрупа М.П., Ослонович Ю.В., Нистратов А.Н., Радченко Л.Г., Даванков В.А. // Высокомолекуляр. соединения. 1995. Т.37А. С.964–968; Davankov V.A., Tsyurupa M.P., Tarabaeva O.G., Shabaeva A.S. Structure and adsorption properties of hypercrosslinked sorbents Styrosorb. Ion Exchange and Development // Proc., ITX-96. Cambridge, 1996.

щихся от рыболовной сети только тем, что в последней все ячейки одинаковы и плоски, а в полученной статистическим (случайным) сшиванием трехмерной сетке они имеют самые различные размеры и изломанные пространственные конфигурации. Чрезвычайно важно теперь понять еще и то обстоятельство, что в полимерной сетке, в отличие от рыболовной снасти, все ячейки взаимно пронизывают друг друга и каждая из них до отказа заполнена фрагментами других ячеек. Конечно, и здесь каждый узел не позволяет связанным цепям удалиться друг от друга. Но, кроме того, в каждой замкнувшейся посредством узлов ячейке теперь оказываются захваченными множество чужих цепей и циклов, большинство из которых уже не может выпутаться. Понятно, что сшивки здесь уплотнили материал, резко уменьшив его способность к деформации и набуханию.

Совсем по-другому выглядит система, если, кроме связываемых в сетку полимерных цепей, она (с самого начала и до конца процесса сшивания) содержит большое количество растворителя. Здесь степень взаимного переплетения ячеек оказывается малой, так как каждая ячейка охватывает больше разбавителя, чем полимерной материи. Такая сетка значительно более подвижна. При заданной постоянной степени сшивания сетки изменение количества разбавителя резко меняет топологию и, следовательно, свойства образующихся сеток. Как ни парадоксально, современные теории сетчатых полимеров совершенно игнорируют этот топологический фактор и не учитывают взаимное проникновение циклов — ячеек сетки.

Теперь представим себе, что в присутствии избытка растворителя мы вводим большое количество длинных и жестких мостиков между развернутыми цепями полимера. Раствор полимера превращается в жесткий гель — пространственную сетку, заполненную растворителем. Попробуем удалить его испарением. Природа не терпит пустоты, и по мере уменьшения объема геля полимерные цепи начинают сближаться. Их сближению, однако, препятствуют жесткие мостики-распорки. Преодолевая сопротивление распорок и накапливая большие напряжения в жесткой ажурной конструкции полимерной сетки, материя при окончательном высушивании достигает какой-то определенной, но не максимально возможной плотности. Так, плотность сверхсшитого полистирола приближается к 0.7 г/см^3, тогда как у исходного полистирола она равнялась 1.05 г/см^3.

Итак, наши сшивки не уплотнили материал, а, наоборот, разрыхлили его, что не вписывается в рамки никаких существующих теорий. Около трети занимаемого образцом пространства осталось свободным, ничем не заполненным. Более того, материал оказался внутренне напряженным. В нем очень большие силы взаимного межмолекулярного притяжения фрагментов полимерных молекул уравновешены столь же значительными напряжениями искаженных сжатием ячеек сетки. При первой же возможности сетка стремится увеличить свой объем, вернуться к исходному состоянию, когда она была заполнена растворителем, а ее ячейки и узлы не испытывали напряжений. Иными словами, внутренние напряжения сетки, стремясь уменьшиться, создают ту дополнительную движущую силу, которая буквально втягивает любые молекулы внутрь сетки. Здесь вполне уместна аналогия со сжатой губкой — с той лишь разницей, что сверхсшитый полистирол прозрачен и даже электронная микроскопия не обнаруживает в материале ни трещин, ни пор: пустоты в полимере имеют нанометровые размеры, не фиксируемые этим методом.

Напряженность сферических образцов сверхсшитого полистирола хорошо заметна в поляризованном свете в виде так называемого мальтийского креста. Внутренняя напряженность структуры проявляется и в том ее необычном свойстве, что сверхсшитый полистирол сильно набухает в таких средах, как метанол или гексан, которые не растворяют линейный полистирол, оказываясь неспособными преодолеть взаимное притяжение полистирольных цепей друг к другу. А в нашем полимере межмолекулярные взаимодействия ослаблены вследствие повышенных расстояний между цепями; к тому же напряженность структуры способствует расши-

рению всей конструкции. И нет никакого противоречия с законами термодинамики в том факте, что даже метанол оказывается способным вызвать сильное набухание полимера. Просто в случае нашего «аномального» полимера взаимодействие метанола с полистиролом — не единственная и, вероятно, не главная причина увеличения объема образца.

Из всего сказанного следует, что сверхсшитый полистирол, стремясь наполнить себя какой-либо материей, должен эффективно поглощать любые вещества из водных или газовых сред. Действительно, воздух и вода наименее благоприятны для заполнения внутреннего пространства в сверхсшитой сетке: воздух имеет слишком малую плотность, а вода слишком полярна и силы сцепления молекул воды между собой слишком велики, чтобы молекулам воды было выгодно распределяться порознь между гидрофобными полистирольными цепями. Зато любые другие органические молекулы — и неполярные, и достаточно полярные — охотно перемещаются в фазу сверхсшитого полистирола. (В отличие от него, широко известные макропористые полистирольные адсорбенты ведут себя «нормально» и почти не поглощают полярные вещества.)

На релаксацию (ослабление) внутренних напряжений в сверхсшитой сетке при адсорбции паров органических растворителей однозначно указывает и тот факт, что объем образца начинает увеличиваться сразу же при поглощении первых порций паров, а не после того, как весь имеющийся в материале свободный объем заполнится поглощенной материей.

Таким образом, механизм поглощения веществ сверхсшитым полистиролом уникален: это скорее растворение в фазе увеличивающегося в объеме полимера, чем адсорбция на его поверхности. Отсюда понятна и исключительно высокая сорбционная емкость материала: он продолжает набухать в сорбате вплоть до достижения сеткой максимально растянутого ненапряженного состояния. В благоприятных случаях один грамм сорбента поглощает до двух-трех граммов сорбата.

Совместно с английской фирмой «Пиролит» нам удалось организовать крупнотоннажное производство сверхсшитого полистирола, сразу же нашедшего применение в процессах обесцвечивания сахарных сиропов и поглощения газовых выбросов промышленных предприятий. Для рентабельности использования нового сорбента в промышленных сорбционных технологиях чрезвычайно благоприятными оказались высокая механическая прочность гранул полимера и его химическая стабильность, а также то обстоятельство, что сорбент легко регенерируется, полностью отдавая поглощенные вещества при нагревании либо при обработке перегретым паром или органическим растворителем.

Замечательные сорбционные свойства сверхсшитого полистирола позволяют решить и принципиально иную задачу, а именно концентрирование следовых количеств органических веществ из воды или воздуха для их последующего анализа. Так, 1 мл сорбента способен полностью извлечь фенол из 3 л питьевой воды. Это настолько важно, что в ближайшее время такие фильтры будут поставлены на вооружение санитарно-эпидемиологических служб, призванных контролировать качество воды. По-видимому, очистка сточных вод от органических загрязнителей на заводах и освобождение питьевой воды от пестицидов и других вредных примесей с помощью бытовых фильтров, заполненных новым сорбентом, — также дело недалекого будущего.

Итак, полимер с комплексом аномальных свойств, не имеющий прав на существование с точки зрения современных теорий эластичности трехмерных сеток, уверенно шагнул в жизнь, хотя и продолжает игнорироваться теоретиками. Он уже дал начало целой серии сорбентов нового поколения. Можно предположить, что найдут применение и его удивительные механические свойства, а именно способность спрессовываться под высоким давлением, а затем вновь значительно расширяться и заполнять собою нужный объем (для этого достаточно смочить материал любым растворителем). Не менее важно, что сверхсшитый «чужак» в мире полимерных сеток рано или поздно заставит пересмотреть теорию и включить в нее топологические представления.

Происхождение основных групп наземных растений

А. С. Антонов

Андрей Сергеевич Антонов, доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом эволюционной биохимии Научно-исследовательского института физико-химической биологии им. А.Н.Белозерского Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова.

БИОЛОГОВ издавна интересовал вопрос о том, как возникло окружающее нас многообразие наземных растений. На этот счет ботаники высказывали вполне правдоподобные гипотезы. Согласно наиболее обоснованной, их предками являются харовые водоросли. Эта гипотеза нашла свое подтверждение и в опытах молекулярных биологов. Так, в нашей лаборатории показано, что в хлоропластной рибосомной ДНК (рДНК) харовых водорослей имеется ген 4.5S рРНК, типичный для всех наземных растений. Поскольку у прочих водорослей его нет, то можно предположить, что этот ген возник у общего предка харовых водорослей и наземных растений, т.е. свидетельствует об их близком родстве.

Особенно интересно выяснить, откуда появились на Земле семенные растения, самые распространенные на всех континентах, исключая, пожалуй, Антарктиду. Ботаники различают среди цветковых растений две большие группы: покрытосеменные и голосеменные. К первым из них они относят хорошо известные нам горох и пшеницу, ландыш, валериану и многие другие виды, образующие цветки, а затем семена. Ближайшие родственники покрытосеменных — голосеменные растения: ели и сосны, хвойник, или кузьмичева трава, жительница пустынь Намибии — вельвичия и множество других видов. Прочие наземные растения, например папоротники, не образуют цветков и семян и имеют с семенными растениями несравненно меньше сходных признаков, чем последние между собой.

Предполагаемую историю эволю-

© А.С.Антонов

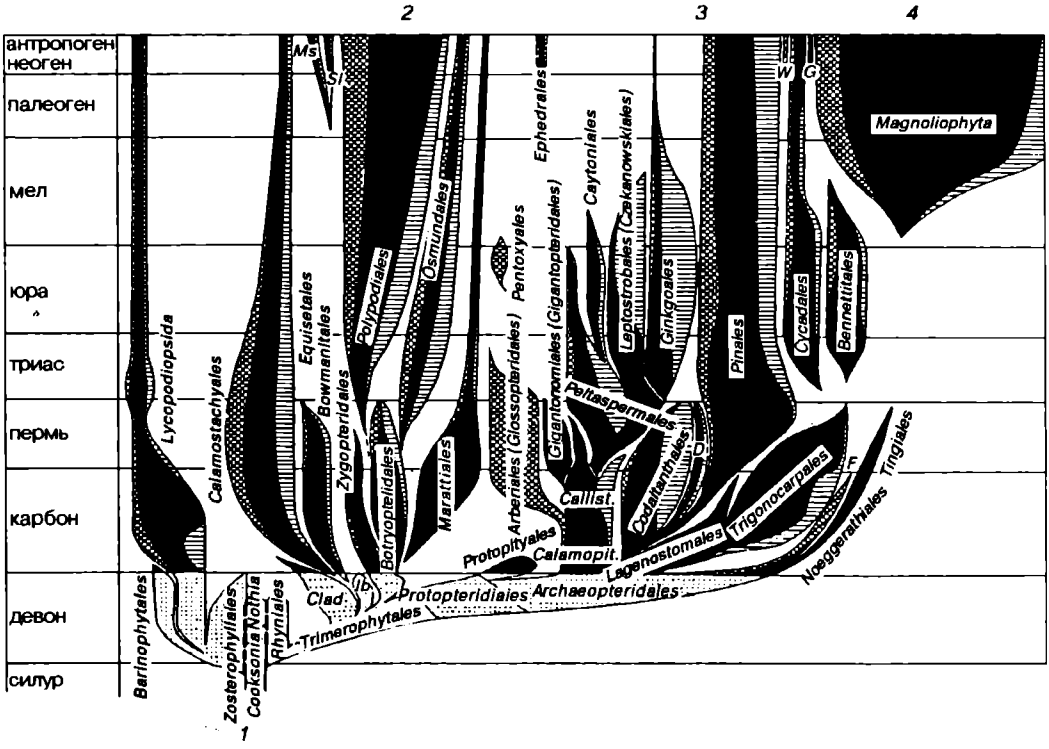


Рис. 1. Схема, отражающая взаимосвязи основных групп наземных растений: 1 — харовые водоросли, 2 — папоротники и другие более просто устроенные растения, 3 — голосеменные растения, 4 — покрытосеменные растения. Видно, что все основные группы (за исключением плаунов) произошли от древней группы тримерофитов. G — гнетовые, W — вельвичиевые. (По: Мейен С.В., 1987.)

ционного становления основных групп наземных растений можно представить в виде схемы, из которой видно, насколько мало мы знаем о родственных связях различных групп (рис.1). К сожалению, на схеме не представлены бриофиты: эта древняя группа отделилась, видимо, на самых ранних этапах эволюции наземных растений. Например, покрытосеменные растения на схеме лишь сближаются с некоторыми естественными группировками (таксонами) голосеменных, но остается неясным, какой из них был прародителем этой группы. Ближе всех к покрытосеменным располагаются гнетовые, но общая предковая группа для них на схеме отсутствует.

Первые ископаемые остатки покрытосеменных находят в земных слоях, возраст которых составляет более 100 млн лет и соответствует меловому периоду. Впрочем, не нужно думать, что в меловых слоях находят целые остатки растений. В большинстве случаев вывод о меловом возрасте покрытосеменных делают на основании найденной цветочной пыльцы, похожей на пыльцу некоторых современных растений. Однако молекулярные биологи считают такой способ определения возраста покрытосеменных ненадежным.

В меловую эпоху на планете царствовали голосеменные, многочисленные папоротники, мхи, хвощи и другие более просто организованные виды. Чтобы распознать, в пределах какой из этих групп возник вид (или виды) — возможный предок всех покрытосеменных растений, ботаники прежде всего используют сравнитель-

но-морфологический метод, т.е. оценивают сходство и различия во внешних признаках растений и по ним делают заключение о степени эволюционной близости. К сожалению, традиционные подходы не позволили получить однозначные результаты. По словам С.В.Мейена, в результате такого анализа в роли гипотетических предков покрытосеменных по очереди перебывали все основные таксоны голосеменных растений и даже красные водоросли[1]. Да, не случайно Ч.Дарвин называл проблему происхождения покрытосеменных «проклятой тайной».

В конечном счете выяснилось, что классическими методами проблема в обозримом будущем вряд ли вообще будет решена. Нужны были какие-то принципиально иные подходы. Их предложила молекулярная биология с ее богатым набором методов исследования нуклеиновых кислот, играющих ведущую роль в хранении и передаче наследственных признаков у всех живых организмов, включая и растения. Постепенно оформилось новое научное направление — молекулярная филогенетика организмов, изучающая происхождение естественных группировок путем сопоставления их макромолекул, несущих генетическую информацию.

Как же молекулярная филогенетика помогла пролить свет на происхождение основных групп наземных растений?

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЛОГЕНЕТИКА В НАЧАЛЕ 90-Х ГОДОВ

Развитие этого научного направления началось с экспериментов по сравнительному изучению аминокислотных последовательностей белков растений. Первые значимые результаты в этой области принадлежат Д.Боултеру и его коллегам[2]. Они утверждали, что покрытосеменные возникли не 125—100 млн лет назад, а много раньше — 400—300 млн лет назад. Эти оценки никак не согласовывались с данными палеоботаники, и потому филогенетическое дерево, построенное Боултером, вызывало нарекания. Известный американский ботаник А.Кронквист резко критиковал выводы Боултера, причем во многом справедливо. Первые робкие попытки (в том числе и наши[3]) построить филогенетическое дерево наземных растений на основе сопоставления их нуклеиновых кислот также не нашли понимания у ботаников.

Скажем честно, в этих первых работах для ботаников действительно было мало нового, и они не увидели перспектив такого направления. Однако непредубежденного исследователя не могло не поразить, насколько повысилась скорость и эффективность филогенетических исследований. Поколения ботаников столетиями собирали все те данные, которые впоследствии легли в основу их филогенетических построений. И вот небольшие группы ученых, применив методы молекулярной биологии, смогли предложить свои варианты филогенетических деревьев, расхождения между которыми отнюдь не превышали расхождений в филогенетических схемах ботаников классической школы.

По-настоящему переломный момент в развитии молекулярной филогенетики растений наступил в 1989 г., когда были опубликованы сразу четыре работы, в которых использовали метод определения последовательностей нуклеотидов в ДНК и РНК[4]. Все

[1] Мейен С.В. Основы палеоботаники. М., 1987.

[2] Boulter D., Ramshaw J.A.M., Thompson E.W., Richardson M., Brown R.H. // Proc. Roy. Soc. Lond. 1972. V.B181. P.441—455; Boulter D., Peacock D. Proc. 8th Int. Conf. on Numerical Taxonomy. San Francisco, 1975. P.176—188.

[3] Bobrova V.K., Troitsky A.V., Ponomarev A.G., Antonov A.S. // Plant. Syst. Evol. 1987. V.156. P.13—27.

[4] Martin W., Gierl A., Saedler H. // Nature. 1989. V.339. P.46—48; Рахимова Г.М., Троицкий А.В., Кликунова И.Н., Антонов А.С. // Мол. биология. 1989. Т.23. С.830—841; Zimmer E.A., Hamby R.K., Arnold M.L., LeBlanc D.A., Theriot E.L. // The hierarcy of life /Eds B.Ferholm, K.Bremer, H.Jornvall. B. V., 1989. P.205—214; Wolfe K.H., Gouy M., Yang Y.-W., Sharp P.M., Li W.-H. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1989. V.86. P.6201—6205.

они подтвердили верность оценки Боултера: действительно, покрытосеменные растения появились на Земле около 300 млн лет назад.

А как же быть с характерной пыльцой, которую находят лишь в гораздо более молодых отложениях? Ответ может быть один: внешние признаки пыльцы у древних покрытосеменных, видимо, были иными, чем у современных форм.

В этих работах выяснилось, что однодольные растения отделились от предков двудольных на самых ранних этапах эволюции покрытосеменных. Кроме того, удалось достаточно строго показать, что эволюционное развитие покрытосеменных началось существенно раньше того момента, когда стали формироваться все современные классы голосеменных растений, т.е. в палеозое.

Однако не все ученые согласились с этими выводами. Так, Е.Зиммер и ее коллеги (Смитсоновский институт, США) строили деревья, исходя из частичных нуклеотидных последовательностей одной из «больших» рибосомных РНК. Форма этих деревьев оказалась неустойчивой, и при незначительной ее модификации получалось, что гнетовые, среди прочих голосеменных, располагались ближе к покрытосеменным растениям, образуя «сестринскую» группу. Иными словами, создавалось впечатление, что именно среди прародителей современных гнетовых и нужно искать гипотетического предка всех покрытосеменных растений.

Такое заключение совпадало с филогенетическими идеями видного ботаника Дж.Дойла (США). Объединив свои усилия, Дойл, Донохью и Зиммер свели воедино морфологические и молекулярные данные и в конечном счете сочли, что выводы ряда ученых о монофилии голосеменных и покрытосеменных неправомерны[5]. Сильным аргументом в пользу гипотезы Зиммер—Дойла послужило открытие у некоторых гнетовых двойного оплодотворения, до недавних пор наблюдавшегося лишь у покрытосеменных растений.

Вскоре эти данные получили мощную поддержку в статье М.Чейза с 42 соавторами (такие огромные коллективы работали ранее разве что в экспериментальной физике!) об эволюции гена *rbcL*[6]. Однако количество исследованных видов было настолько велико (несколько сотен), что авторы не смогли привести четких статистических доказательств достоверности сделанных выводов, которые сегодня чаще всего получают современным статистическим методом, называемым бутстреп-анализом. Были у этой работы и другие уязвимые места. Так, В.Мартин (Германия) и его коллеги нашли, что хотя скорость накопления замен нуклеотидов в гене *rbcL* относительно мала, у представителей групп, разошедшихся на ранних этапах эволюции, число замен в этом гене близко к насыщению. Такой вывод снижает достоверность заключений о ранних этапах эволюции семенных растений и делает вывод о близости гнетовых и покрытосеменных недостаточно надежным. Нужно было дополнительно исследовать какие-то другие молекулы, чтобы решить вопрос о происхождении покрытосеменных. Один из таких «молекулярных маркеров» и был предложен нашей лабораторией.

ПОКРЫТЫЕ ГОЛОСЕМЕННЫЕ РАСТЕНИЯ

Параллельно с опытами Чейза и его группы мы изучили участок хлоропластной ДНК длиной приблизительно 600 нуклеотидов, расположенный между двумя генами рРНК; в ходе образования молекул рРНК он также «считывается» с молекул ДНК (транскрибируется), а потому его научное название — внутренний транскрибируемый спейсер генов рРНК (CPITS).

Казалось, что вопрос близок к

[5] Doyle J.A., Donoghue M.A., Zimmer E.A. // Ann. Missouri Bot. Garden. 1994. V.81. P.419—450.

[6] Chase M.W. et al. (42 co-authors) // Ann. Missouri Bot. Garden. 1993. V.80. P.528—580.

окончательному решению, но в 1997 г. появилась статья Д.Солтиса с 15 соавторами, в которой представлены результаты исследования эволюции того же самого гена 18S рРНК, что и в опытах В.Ли. Хотя объект исследований был тот же самый, выводы существенно отличались: Солтис с коллегами опять попытались реанимировать идею о близком родстве гнетовых и покрытосеменных[7]. Как мне кажется, построенные ими филогенетические деревья не дают для этого достаточно оснований. Во-первых, авторы не использовали для них так называемые «внешние группы», за исключением эфедр и гнетумов (пять видов). Хотя авторы и упоминают, что изучали некоторые достаточно отдаленные виды, на схеме их нет. Между тем, введение внешних групп может самым непредсказуемым образом сказаться на характере ветвления. Во-вторых, из схемы следует, что статистическая достоверность характера ветвления в этом участке дерева слишком низка для сколько-нибудь обоснованных выводов.

Так или иначе, но вопрос этот нельзя считать окончательно решенным. Работа в этом направлении продолжается. Мы определили последовательности нового участка рДНК хлоропластов и вновь построили деревья. Эти данные лишь подтвердили ранее полученные результаты.

Более того, из всех этих работ вытекает еще один принципиальный вывод: деление всех покрытосеменных на две группы, однодольные и двудольные, не согласуется с молекулярными данными. Макросистема покрытосеменных в этой части нуждается в радикальной ревизии.

Обратимся теперь к более просто организованным растениям. Недавно аспиранты и сотрудники лаборатории геносистематики растений нашего института В.К.Боброва, К.М.Вальехо-Роман, В.Горемыкин, Т.Х.Самигуллин и А.В.Троицкий, а также наши немецкие коллеги И.Панке и У.Мартин изучили филогенетические связи папоротников, семенных растений и бриофитов[8].

Работами немецкого ученого Ю.Беле и его коллег показано, что в молекулярно-филогенетических исследованиях такая некодирующая ДНК имеет ряд преимуществ перед ДНК, кодирующей РНК и белки: в пересчете на единицу длины в ней может быть существенно больше так называемых «полиморфных сайтов» (т.е. нуклеотидов, заменяемых на другие в ходе эволюции), которые учитываются при построении филогенетических деревьев. Согласно нашим данным, в этом участке хлоропластной ДНК скорость накопления замен нуклеотидов приблизительно в три раза ниже, чем в гене *rbcL*. Значит, до насыщения этого участка ДНК мутациями далеко, что существенно повышает надежность выводов.

Определив нуклеотидные последовательности спейсеров у нескольких десятков видов покрытосеменных и голосеменных растений, мы провели тщательный компьютерный анализ всех полученных данных и построили филогенетические деревья с помощью нескольких независимых и самых современных методов[9] (см., например, рис.2). Ни одно из них не говорит о филогенетической близости гнетовых и покрытосеменных, хотя по ряду других признаков эти деревья близки к тем, которые построены на основе изучения генов *rbcL* и рРНК. Так, по всем данным, выходило, что древнейшие покрытосеменные — это нимфейные (к ним относятся всем известные кувшинки, лотос и ряд других сходных растений). В этом вопросе противоречий между ботаниками и молекулярными биологами нет: ботаники тоже считают нимфейных древнейшей группой среди покрытосеменных. Для нас, однако, гораздо важнее другой вывод:

[7] Soltis D.E., Soltis P. et al. // Ann. Missouri Bot. Gard. 1997. V.84. P.1—49.

[8] Goremykin V., Bobrova V., Pahnke J., Troitsky A., Antonov A., Martin W. // Mol. Biol. Evol. 1996. V.13.

[9] Antonov A.S., Troitsky A.V. // Mol. Biol. 1995. V.29. № 6. Part 1. P.728—735.

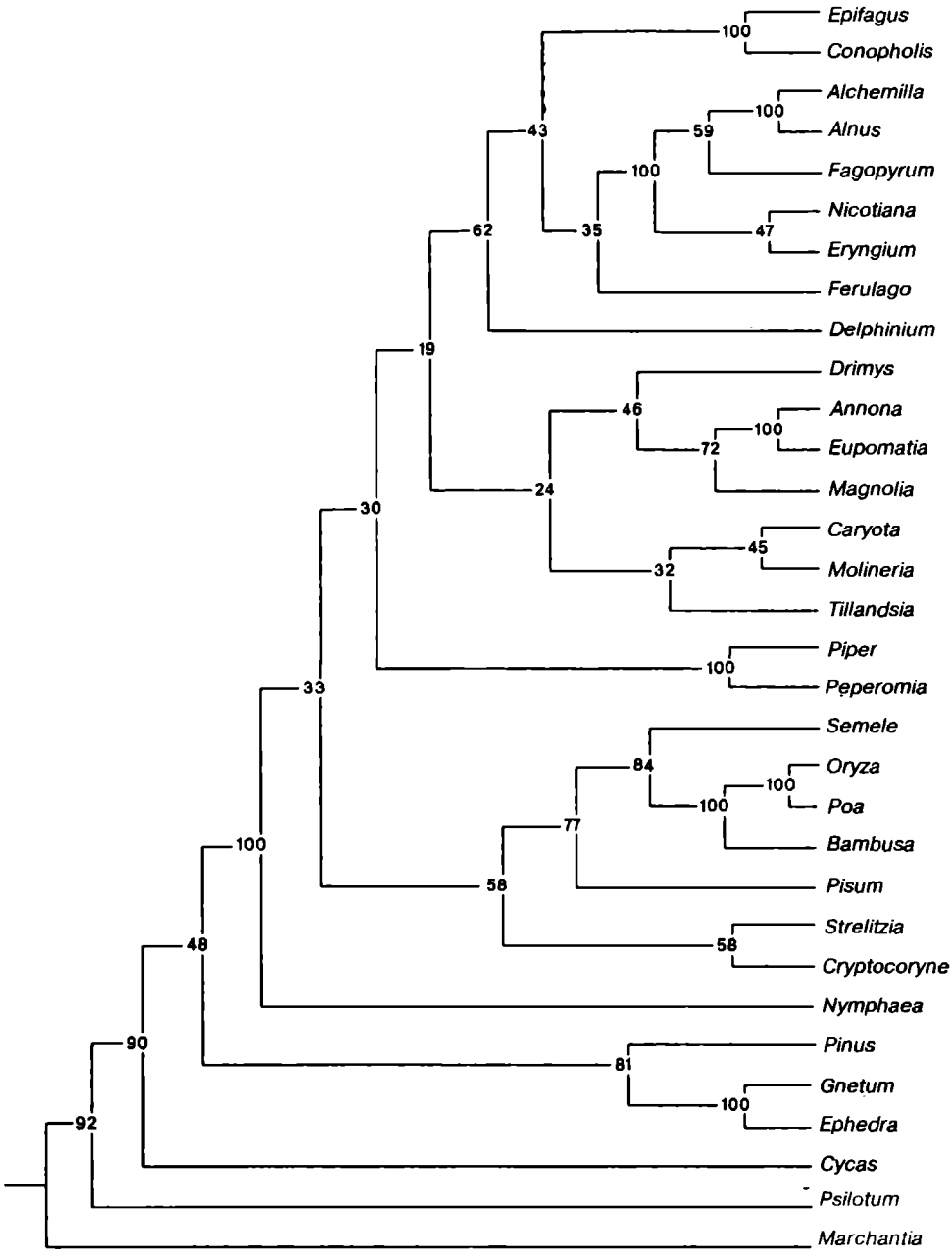


Рис. 2. Филогенетическое дерево, построенное по результатам сопоставления структуры межгенного спейсера хлоропластных ДНК голосеменных и покрытосеменных растений. Числа указывают величину индекса бутстрепа. Внешние группы выделены цветом.

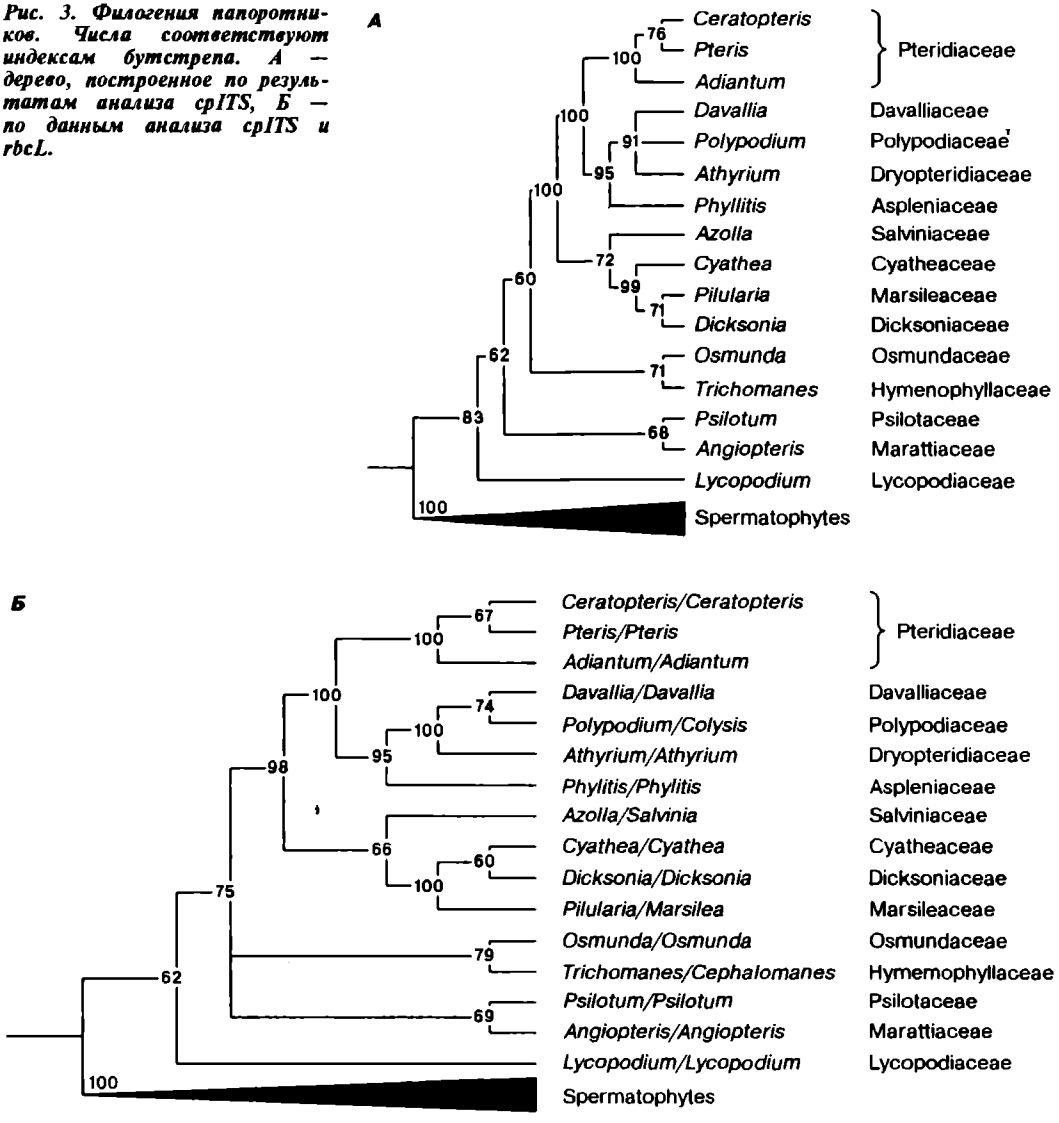


Рис. 3. Филогения папоротников. Числа соответствуют индексам бутстрепа. А — дерево, построенное по результатам анализа cpITS, Б — по данным анализа cpITS и rbcL.

так как линии покрытосеменных и голосеменных разошлись очень давно, двойное оплодотворение, видимо, появилось независимо у гнетовых и покрытосеменных. Из этого следует, что даже такие важнейшие признаки могли возникать в разных группах конвергентно, т.е. независимо друг от друга. А ведь именно конвергентные признаки чрезвычайно затрудняют анализ, проводимый классическими методами ботаники! Другое объяснение заключается в том, что двойное оплодотворение было у общих предков покрыто- и голосеменных, но в ходе эволюции большинство голосеменных его утеряло.

В конечном счете, объединив данные наши и Чейза, мы совместно с В.Мартином построили общее дерево, которое также не содержало никаких указаний на близость гнетовых и покрытосеменных. Отрадно, что в США В.-Х.Ли и его коллеги, проанализировав гены «больших» рРНК, год спустя пришли к тем же выводам.

На построенных ими деревьях вслед за нимфейными от общего

ствола покрытосеменных отделялись однодольные растения и так называемые «палеотравы». К ним относятся ближайшие родственники магнолиевых, которых ботаники ставили непосредственно у корня дерева и выводили из них все покрытосеменные растения. Оказалось, однако, что, вопреки мнению ботаников, первые покрытосеменные были скорее всего не деревья и кусты, а травы. На наш взгляд, это кажется более естественным: трудно представить себе, как из водорослей могли образоваться древесные формы, минуя водные травянистые семенные растения. Вопреки схеме Мейена, кузьмичева трава (эфедра) и гнетум оказались близкими родственниками, достаточно удаленными от хвойных.

В целом эти молекулярные деревья несколько отличались от построенных классическими методами и позволяли в ряде случаев по-новому осветить проблему происхождения семенных растений.

ПТЕРИДОФИТЫ

Основное внимание мы уделили папоротникам. Однако для понимания ранних этапов эволюции наземных растений использовали структуру cpITS хлоропластных ДНК плауна и псилота.

По результатам анализа этого фрагмента хлоропластных рДНК мы построили филогенетическое дерево, отражающее эволюционные отношения папоротников и семенных растений (рис.3,*А*). Длина ветвей на дереве соответствует количеству замен нуклеотидов, накопленных в ходе эволюции каждым из изученных видов, т.е. глубине их молекулярной дивергенции. В целом полученная схема неплохо согласуется с представлениями ботаников. Первыми от общего ствола отходят ближайшие родственники папоротников: плаун, псилот и ангиоптерис. Если свести воедино результаты, полученные при изучении фрагмента хлоропластной рДНК и гена *rbcL*, то надежность выводов увеличится. Дерево, построенное на такой основе (рис.3,*Б*), в принципе не отличается от дерева покрытосеменных (рис.3,*А*).

Дополнительные сведения о филогении папоротников дает определение встречаемости делеций в структуре cpITS. Так, у представителей *Aspleniaceae, Polypodiaceae, Davalliaceae* и *Dryopteridiaceae* есть общая делеция, не свойственная другим птеридофитам.

Очевидно, что филогенетическое дерево птеридофитов (рис.3,*Б*) имеет «более развитую крону», чем дерево покрытосеменных растений (рис.3,*А*), которое скорее напоминает куст. Это говорит о том, что формирование основных таксонов покрытосеменных на некотором этапе их эволюции от общих предков с голосеменными растениями происходило очень быстро.

БРИОФИТЫ

Итак, наземные растения и харовые водоросли имеют общего предка. По нашим данным, после выхода растений на сушу наметились, как минимум, две линии их эволюционного развития: одна ведет к современным печеночникам (изображение одного из них, маршанции, имеется даже в школьном учебнике ботаники), а другая — к мхам и более сложно устроенным растениям (рис.4). Немецкие исследователи Г.Бопп и И.Капезиус, сопоставляя строение генов 18S рРНК, выделили три линии эволюционного развития: нижний кластер на нашей схеме они разделили на маршанциевых и юнгерманиевых. В нашей схеме эти две ветки также расходятся на самых ранних этапах эволюции печеночников. Не исключено, что существовали и другие линии эволюционного развития, но эти растения полностью вымерли. Если наша схема действительно отражает филогенетические связи изученных таксонов (с полной уверенностью этого утверждать нельзя, так как исследовано пока очень мало видов), то из нее следует один принципиально важный вывод. Поскольку линия, ведущая к мхам, отделилась от общего ствола **после**

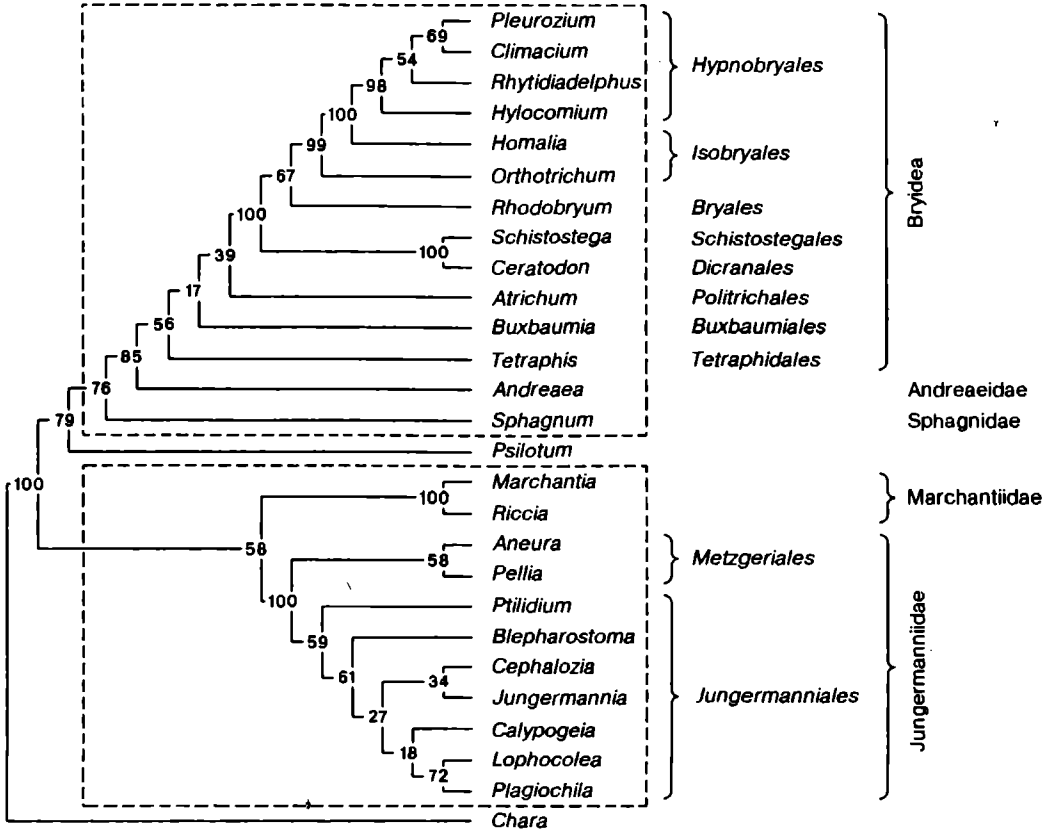


Рис. 4. Филогения бриофитов.

отделения линии к более сложно устроенным растениям (на схеме — это псилот), значит, бриофиты не представляют собой единой естественной группировки (т.е. немонофилетичны). Результаты этих опытов не согласуются с существующей системой бриофитов: ее, видимо, нужно пересматривать[10].

Однако вывод этот носит предварительный характер, поскольку общее число видов бриофитов, исследованных нами, все еще невелико, а некоторые их группы вообще не изучены (например, антоцеротовые мхи). С другой стороны, он наглядно демонстрирует возможности молекулярной филогенетики, позволяющей небольшому коллективу авторов за короткий срок получить результаты, которые дают филогенетикам растений пищу для размышлений.

Итак, сегодня мы еще не можем описать все детали эволюции наземных растений, хотя ряд принципиальных моментов уже ясен. Чтобы получить более надежные результаты, предстоит изучить множество других генов и пополнить список исследованных видов растений. Мы продолжаем эту работу и надеемся в самом недалеком будущем построить полное филогенетическое дерево всех наземных растений.

[10] Самигуллин Т.Х., Боброва В.К., Вальехо-Роман К.М., Троицкий А.В., Антонов А.С. // Молекуляр. биология. 1997 (в печати); Красилов В.А., Бугдаева Е.В., Маркевич В.С., Маслова Н.П. Проангиоспермы и происхождение цветковых растений // Рос. наука. Выстоять и возродиться. М., 1997. С.294—302.

Мейоз и гены

И. Н. Голубовская,
доктор биологических наук
Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И.Вавилова
Санкт-Петербург

В ОСНОВЕ роста, развития и преемственности жизни на Земле лежат процессы деления клеток. У многоклеточных организмов с половым размножением различают два основных типа деления клеток: митоз и мейоз. Их механизмы еще очень далеки от понимания[1]. Среди цитологов, изучающих жизнь клеток, нет даже согласия в вопросе о функции ряда структур, которые появляются в процессе клеточного деления[2].

Центральную роль в обоих типах деления играет самокопирование и распределение по дочерним клеткам носителей генов — хромосом. У растений и животных хромосомы представляют собой гигантские линейные молекулы ДНК, связанные с белками. Именно ДНК обладает свойством самокопирования, или репликации. Хромосомы индивидуальны в смысле состава ДНК. Каждая из них несет лишь часть от общего набора генов. Число и структура хромосом относительно постоянны у большинства особей одного вида. У высших организмов набор хромосом парный: одна половина от матери, другая — от отца. Такие пары называют гомологичными.

Суть митоза (от греч. — нить) состоит в репликации и точном распределении между дочерними клетками набора хромосом клеточного ядра. Так обеспечивается преемственность материальных носителей наследственной информации. В случае же мейоза (от греч. — уменьшение, убывание) происходит закономерное уменьшение вдвое числа хромосом (редукция). Половые клетки, или гаметы, несут лишь по одному гомологу каждой пары хромосом. Именно мейоз лежит в основе законов наследования Менделя и хромосомной теории наследственности. Независимое наследование разных генов и их сочетание у потомков основано на независимом расхождении разных пар гомологичных хромосом в гаметы. Кроме того, в мейозе могут обмениваться гены, лежащие и в одной хромосоме.

Интерес к мейозу резко возрос в конце 60-х годов, когда выяснилось, что одни и те же контролируемые генами ферменты могут принимать участие во многих процессах, связанных с ДНК, например с ее воспроизведением, обменом участками и т.д. Наконец, в последнее время ряд биологов развивает оригинальную идею: мейоз у высших организмов служит гарантом стабильности генетического материала, ибо в процессе мейоза, когда пары хромосом-гомологов тесно соприкасаются, происходит проверка нитей ДНК на точность и восстановление повреждений, затрагивающих сразу обе нити[3]. Изучение мейоза связало методы и интересы двух наук: цитологии и генетики. Это привело к рождению новой ветви знания — цитогенетики, тесно соприкасающейся ныне с молекулярной биологией и генной инженерией.

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ МЕЙОЗА И ЕГО ЭТАПЫ

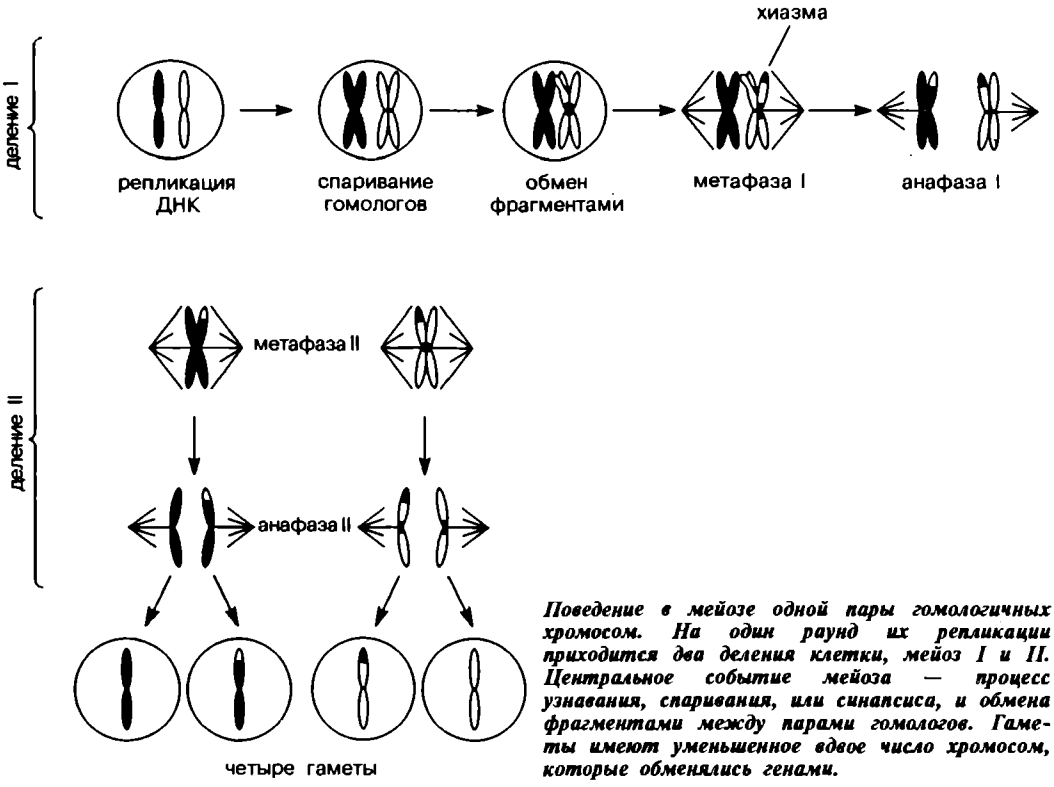
Мой интерес к генетическому анализу и изучению мейоза возник после семилетнего исследования при-

© И.Н.Голубовская

[1] Murray A., Hunt T. The Cell Cycle: An Introduction. N.Y., 1993.

[2] Moens P. Molecular perspectives of chromosome pairing at meiosis // Bioessays. 1994. V.16. № 2. P.101—106.

[3] Гершензон С.М. Происхождение и эволюция пола // Природа. 1991. № 1. С.24—30.



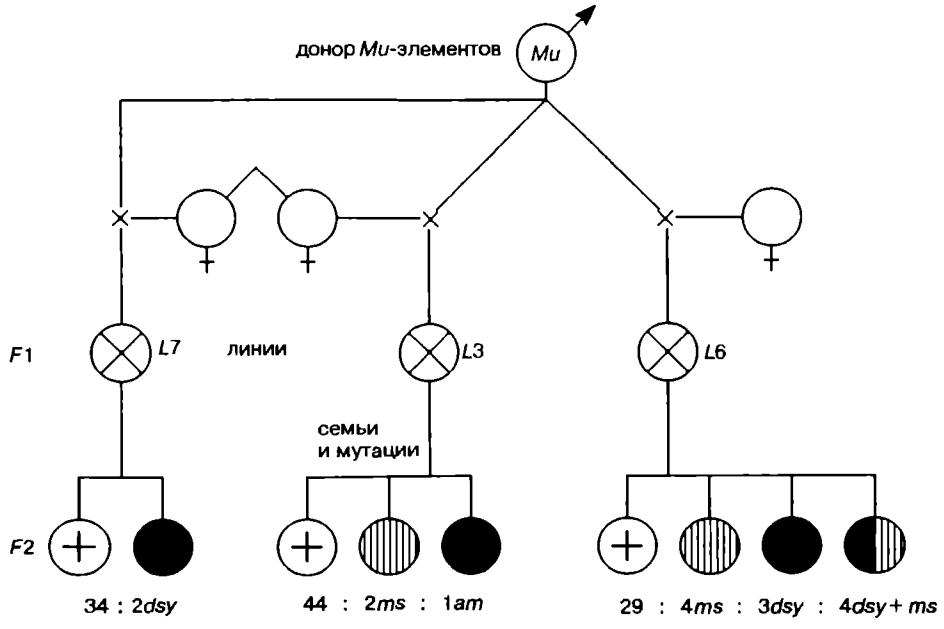
Поведение в мейозе одной пары гомологичных хромосом. На один раунд их репликации приходится два деления клетки, мейоз I и II. Центральное событие мейоза — процесс узнавания, спаривания, или синапсиса, и обмена фрагментами между парами гомологов. Гаметы имеют уменьшенное вдвое число хромосом, которые обменялись генами.

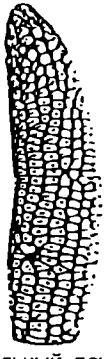
чин пониженной плодовитости гибридов пшеницы с ее дикими сородичами. Заманчивая идея селекционеров объединить в одном гибриде хромосомы пшеницы и пырея натолкнулась на сито мейоза — у гибридных растений в мейозе хромосомы расходились как попало, и в итоге плодовитость падала. Стало ясно, что необходимо знать, каким образом гены контролируют поведение хромосом.

В самом начале 70-х годов я наметила долговременную программу изучения цитогенетики мейоза. Генетика обладает надежным инструментом познания цепи сложных процессов путем изучения изменений генов (мутаций), нарушающих ход отдельных звеньев. Надо было выбрать удобный с точки зрения цитологии и генетики объект и вести систематический поиск и анализ мутаций, нарушающих мейоз (далее просто — *mei*-мутаций). Кукуруза вполне подошла для этих целей. Это растение, прекрасно изученное с точки зрения и цитологии и генетики, имеет всего 10 пар относительно крупных хромосом. Кроме того, у кукурузы к началу 70-х годов уже было найдено несколько *mei*-мутаций.

В поисках новых мутаций я исходила из представления о мейозе как универсальном биологическом процессе. С единых позиций удалось систематизировать все имевшиеся разрозненные данные о проявлении *mei*-мутаций на разных объектах — дрожжах, растениях, насекомых и человеке — и сформулировать концепцию генного контроля мейоза[4]. Но прежде чем изложить ее принципы, необходимо хотя бы в самых общих чертах описать сложный танец хромосом при делении клетки в мейозе.

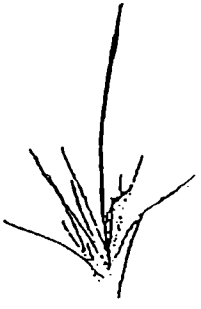
[4] Голубовская И.Н. Генетический контроль поведения хромосом в мейозе // Цитология и генетика мейоза. Новосибирск, 1975. С.546; Golubovskaya I.N. // Int. Rev. Cytol. 1979. V.58. P.247—290; Golubovskaya I.N. // Advance in Genetics. 1989. V.26. P.149—192.





нормальный початок

нормальная метелка



метелка стерильного растения

Поиск мутаций мейоза в потомстве гибридов с носителем прыгающих Mu-элементов, которые часто встраиваются в разные гены и вызывают мутации, что выявляется в ходе цитологического анализа. Видно, что в отдельных семьях при самоопылении (⊗) могут возникать одновременно и мутации стерильности (ms), и мейоза (am и dsy — черные кружки). F_1 и F2 — поколения скрещиваний, цифры указывают число нормальных семей и семей, выщепляющих мутанты.

Цитологи выделяют в этом танце четыре основные фигуры, или фазы: профаза, метафаза, анафаза и телофаза. Суть мейоза можно кратко выразить так: один раунд репликации хромосом приходится на два деления клетки. В итоге четыре дочерние половые клетки, как это показано на рисунке, имеют вдвое сниженное число хромосом.

Центральное событие начальных этапов мейоза — таинственный процесс узнавания гомологичных хромосом, их попарное сближение друг с другом, и тесное соприкосновение, называемое синапсисом (от греч. — соединение, связь). В ходе синапсиса гомологи обмениваются фрагментами. В световом микроскопе последствия этого обмена видны как перекресты, или хиазмы.

После синаптического танца и

Таблица
Типы мутаций мейоза, полученные разными способами

Ключевой этап мейоза, блокированный при мутации	Символ мутации и пути их получения					
	а		*б*		*в*	
Готовность клеток к мейозу					*mac*1	10*S*
Запуск мейоза	*am*1	5*S**	*am*1-*pra I**		*am*1-489* *am*1-485*	
Регуляция первого деления мейоза (редукционное)			*afd*1	6*L*		
Узнавание, сближение и синапсис гомологов	*as*1	1*S*	*dsy*1* *dsy*2, *dsy*3, *dsy*4	 *dchi*1-9307*	*dsy*1-523* *dsy*489, *dsy*261	
Образование и поддержание хиазм	*dy*				*dsy*483, *dsy*485	
Расхождение гомологичных хромосом	*dv*1		*ms*43 *ms*28	8*L* 1*S*	*seg* 513	
	el	8*L*				
Деление клетки, или цитокинез	*va*	7*L*				
Митоз после мейоза	*po*1*	6*S*	po1-*ms*4*		*po*-495	
Мутации с множественным и разнообразным действием на процесс мейоза	*st*1	4*S*	*pam*1 *mei*-025		*st*-485 *pam*-485 *mei*-775 *dem*-483	

Примечание. *а* — мутации, накопленные в мировой коллекции кукурузы; *б*, *в* — выделенные нами в процессе химического и транспозонного мутагенеза соответственно; справа в колонках указана хромосома и плечо (*L* — длинное, *S* — короткое), где ген локализован, * — аллели одного гена.

обмена фрагментами хромосомы выстраиваются на экваторе клетки. В это время они напоминают пару лыж, сцепленных в районе креплений, который у хромосомы называется центромер. Затем в клетке появляется специальный нитевой аппарат, идущий от полюса к полюсу, — веретено. Часть нитей веретена в метафазе прикрепляется к центромерам и растаскивает их в разные стороны к полюсам (стадия анафазы). Хромосома без центромера-крепления не может существовать и сразу же утрачивается, как чемодан без ручки. Точное расхождение гомологичных пар к противоположным полюсам лежит в основе редукции их числа.

Во втором делении мейоза центромеры разделяются, и возникшие ранее копии каждой пары просто расходятся, после чего образуются еще две дочерние клетки. Второе деление мейоза в принципе соответствует митозу. Таков в общем виде сценарий основных цитологических картин мейоза у самых разных организмов.

ПОИСК, ПОЛУЧЕНИЕ *mei*-МУТАЦИЙ И ИХ КОЛЛЕКЦИЯ

Анализ репертуара мутаций, нарушающих общий ход мейоза и найденных у разных объектов, позволил мне прийти к выводу, что есть по крайней мере семь ключевых этапов, которые находятся под контролем генов: запуск мейоза, или переключение деления с митоза на мейоз; попарное сближение и синапсис гомологов; обмен кусками гомологичных

хромосом, или рекомбинация; образование хиазм; расхождение гомологов; инициация второго деления; и собственно разделение надвое клетки.

У кукурузы за более чем полувековой период изучения ее цитогенетики было найдено лишь восемь *mei*-мутаций. Из моей концепции следовало, что репертуар *mei*-мутаций при их целенаправленном поиске может и должен быть резко расширен. Действительно, мне удалось удвоить мировую коллекцию. Как же велся поиск мутаций? С этой целью были использованы два метода искусственного мутагенеза: химический, когда клетки подвергаются воздействию определенных веществ, и использование линий с прыгающими генами, так называемыми транспозонами, способными перемещаться по хромосомам и вызывать изменения самых разных генов.

Если мейоз нарушен, то прежде всего страдают половые клетки, или гаметы, и возникает стерильность одного или двух полов. У кукурузы стерильные метелки видны невооруженным глазом на стадии цветения. Еще легче выявляются початки без зерен, что вызвано женской стерильностью. С помощью химического мутагенеза было получено девять мутаций, среди которых восемь были изменениями новых генов и лишь одна мутация возникла как новый вариант (аллель) уже известной *mei*-мутации (см. таблицу). Мутагенез с использованием *Mu*1-транспозона оказался чрезвычайно плодотворным для получения новых *mei*-мутаций. Эта работа проводилась в содружестве с американским генетиком В.Ф.Шериданом на базе университета Северной Дакоты (США). Всего за три года мы выделили более 20 транспозонных *mei*-мутаций (см. таблицу).

Многие найденные в работе генетические нарушения мейоза были новыми для кукурузы. При этом одна из мутаций оказалась вообще уникальной для высших растений[5], другие представляли собой варианты уже известных ранее генов мейоза, открытых мной и другими авторами.

Определение того, относится ли мутация к одному или разным генам, требует специального теста на аллелизм. Затем проводится кропотливая локализация мутаций. Найденные мутации затрагивают почти все ключевые этапы мейоза. Случаи повторного нахождения аллельных вариантов того или иного гена, как, например, для гена *am*1, запускающего мейоз, или для гена *po*1, контролирующего окончание второго деления, по всей видимости, указывают на малое число генов, контролирующих данный ключевой этап мейоза. Генетический анализ продолжается. Интересно, что *mei*-мутации оказались в самых разных хромосомах.

СИНАПСИС И ГЕНЫ

Мутации, нарушающие синапсис гомологичных хромосом, представляют наиболее обширный класс *mei*-мутаций у большинства видов животных и растений. В норме «танго для двоих» гомологичных хромосом протекает в гармонии, и набор из 10 пар гомологов в определенном порядке располагается в районе экватора. Удвоенные центромеры каждого из гомологов ориентированы к противоположным полюсам, и гомологи регулярно расходятся. Каждая дочерняя клетка получила по 10 центромеров. У десинаптического мутанта, обозначенного символом *dsy*1, даже неспециалисту виден дискомфорт в поведении хромосом. Заметны одинокие хромосомы (называемые унивалентами), не нашедшие своих партнеров. Такие унивалентные хромосомы не могут правильно ориентироваться в метафазе и поэтому беспорядочно распределяются между полюсами. Дочерние клетки в результате первого деления получают разное число хромосом и затем погибают.

Танго танцуют только вдвоем. Этот образ приходит на ум при наблюдении сложного поведения в мейозе контактирующих пар гомоло-

[5] Sheridan W.F., Avalkina N.A., Batygina T.B., Shamrov I.I., Golubovskaya I.N. // Genetics. 1996. V.142. P.1009—1020.

гичных хромосом, пришедших от мужского и женского родителей. В конце 50-х годов американский цитолог М.Мозес, изучая в электронном микроскопе профазу мейоза у речного рака, открыл белковую нитевидную структуру, которая обеспечивает синапсис хромосомных нитей. Она была названа синаптонемным комплексом (СК). Сначала пары хромосом соединяются боковыми элементами СК, а затем центральный элемент СК соединяет их подобно застежке-молнии. К середине профазы СК исчезают, и хромосомы, претерпевшие обмен, держатся только в области перекреста (хиазмы).

Детально изучать синаптические мутации стало возможно только после открытия СК (благодаря электронной микроскопии), и особенно с развитием техники распластывания синаптонемного комплекса на поверхности капли, когда он появляется в профазе первого деления. Вместе с З.К.Гребенниковой нам удалось получить картину СК для *mei*-мутантов кукурузы и наблюдать синапсис гомологичных хромосом в норме и у мутанта *dsy*1. В норме двойная структура СК каждой гомологичной пары строго идентифицируется по положению центромеры и соотношению длины короткого (*S*) и длинного (*L*) плечей хромосом[6].

При наблюдении СК на стадии синапсиса у мутанта *dsy*1 трудно проследить синаптический путь даже одной хромосомы. Часть хромосом так и не находит своих партнеров, они видны как одиночные нити. Те же, которые нашли своих партнеров, оказываются непостоянны в своем выборе и с легкостью их меняют, образуя замысловатые синаптические конфигурации. Сравнивая картины световой и электронной микроскопии мутанта и нормы, можно сделать вывод, что при мутации dsy1 нарушены самые ранние стадии синапсиса, а именно опознавание гомологов. Анализ ряда других десинаптических мутаций показал, что у них СК начинает распадаться преждевременно, что и приводит к аномалиям расхождения.

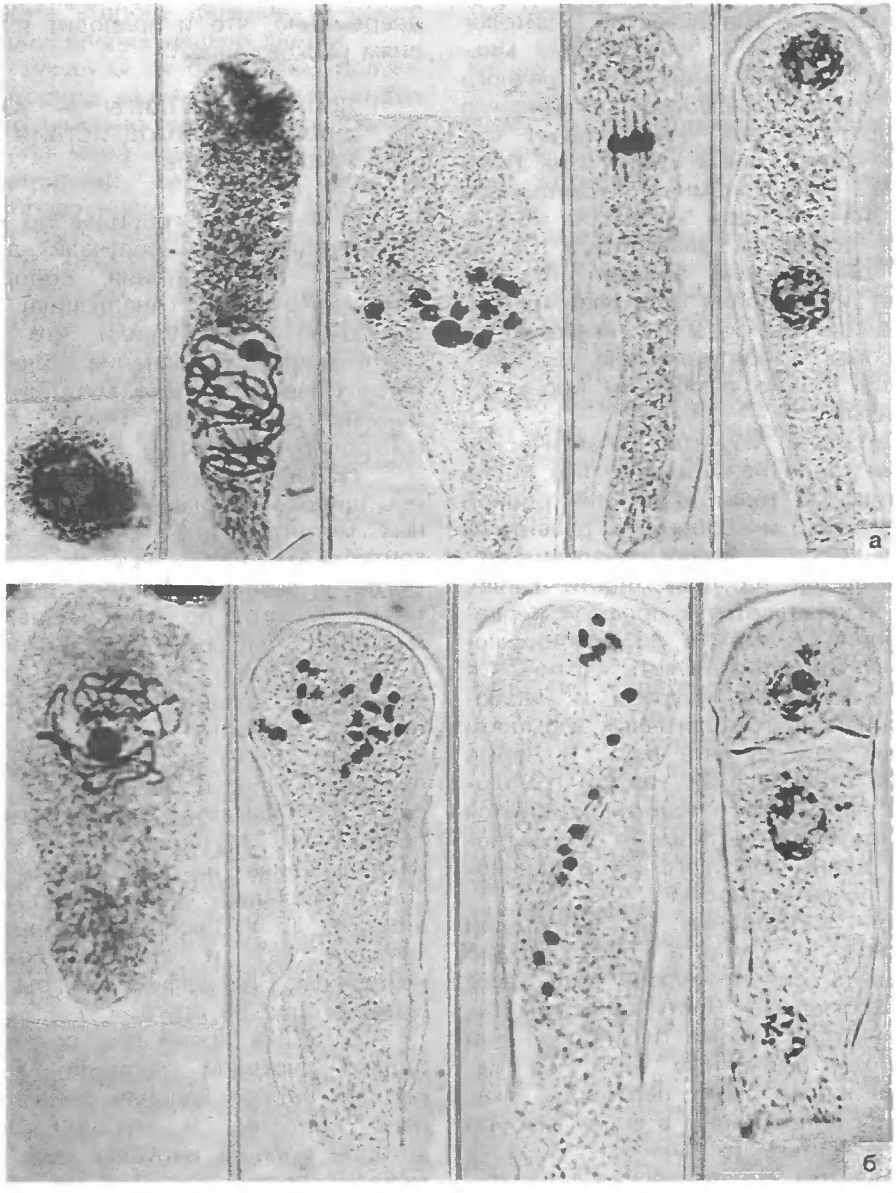
ДВОЙНЫЕ МУТАНТЫ — КЛЮЧ К АНАЛИЗУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И РАСПИСАНИЯ ГЕНОВ

В потомстве гибридов по разным *mei*-мутациям мы получали двойные мутанты, т.е. растения, содержащие обе *mei*-мутации. Анализируя у них ход мейоза, установили, что ранний ген блокирует проявление более позднего. Сочетая разные мутации, определили расписание генов, которые контролируют мейоз у дрожжей.

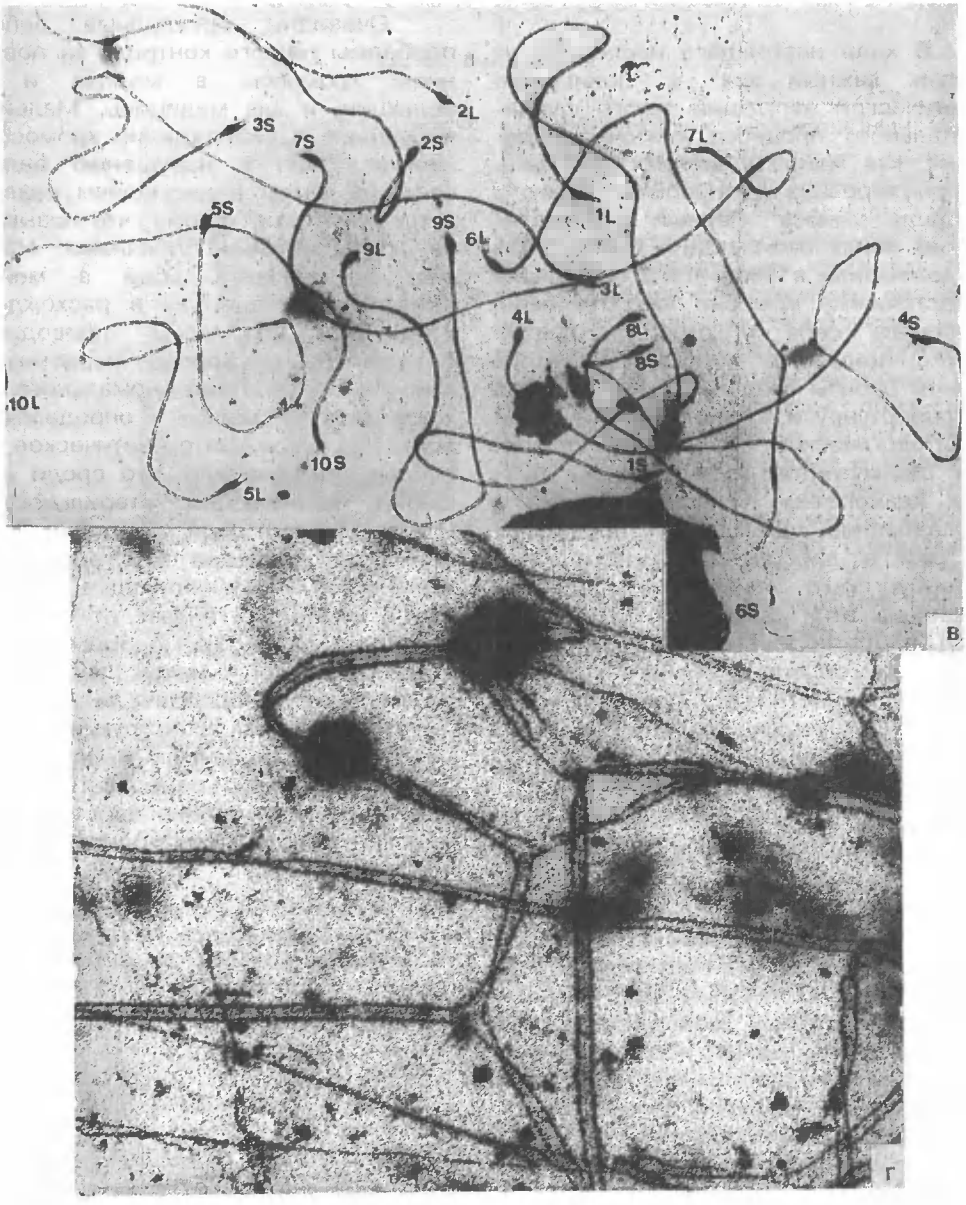
В нашем исследовании мы впервые широко использовали метод двойных мутантов для изучения генного контроля мейоза у высших растений. Согласно законам Менделя, в потомстве гетерозигот по двум независимым мутациям наблюдается соотношение 9:3:3:1, а при их взаимодействии получается расщепление 9:3:4. Так, ген *as*1, открытый Бидлом в 1930 г., нарушает синапсис гомологов, и в профазе I мейоза большинство хромосом располагается не парами, а поодиночке. Мутация *ms*43 в свою очередь влияет на расхождение хромосом и проявляет свой эффект лишь с анафазы I. У двойного мутанта обе мутации *as*1 и *ms*43 действовали независимо, их эффект как бы накладывался друг на друга.

В то же время при сочетании в одном растении мутации *afd*1, у которой первое деление мейоза заменено митозом, и мутации *am*1, у которой вообще нарушен весь запуск мейоза, первая мутация не проявлялась вовсе, из чего следует более раннее вступление в игру гена *am*1. Изучение набора двойных мутантов позволило выстроить последовательность их действия в мейозе: сигнал к запуску мейоза (ген *am*1); сигнал к началу первого деления мейоза (*afd*1); узнавание гомологичных хромосом (*dsy*1); и далее серия генов десинапсиса.

[6] Golubovskaya I.N., Avalkina N.A., Grebennikova Z.K., Sheridan W.F. // Genetics. 1993. V.135. P.1151—1166.



Мейоз у кукурузы в норме и у десинаптического мутанта dsy1 под световым (а, б) и электронным (в, г) микроскопом. Первое деление мейоза в женской материнской клетке: а — норма (слева-направо): клетка приступает к делению, увеличиваясь в размере; профаза I — гомологичные хромосомы объединяются в пары, четко видны все 10 пар хромосом; хромосомы организованы в метафазную пластинку, при этом гомологи ориентированы центромерами к противоположным полюсам; первое деление мейоза завершено, видны две дочерние клетки в каждой по одному ядру; б — десинаптический мутант dsy1 (слева-направо): хромосомы в профазе I синаптируют аномально; в результате нарушения синапсиса вместо 10 пар гомологов наблюдаются 20 одиночных хромосом, которые беспорядочно



распределяются между двумя полюсами; первое деление мейоза завершено, но обе дочерние клетки ненормальны, с дополнительными ядрами или микроядрами (увел. в 500 раз); в — распластанное ядро в норме на стадии полного синапсиса; виден весь набор СК для 10 пар гомологичных хромосом, причем каждая пара идентифицируется по соотношению размеров плеч: L — длинного и S — короткого (увел. в 6000 раз); г — фрагмент аномального синапсиса у мутанта dsy1, у которого нарушено узнавание гомологов. В центре виден переброс СК с одной хромосомы на негомологичную ей; вверху и внизу видны одиночные нити СК, не нашедшие своих партнеров (увел. в 10 000 раз).

ЗНАЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЙОЗА

В ходе настоящего исследования сделан важный шаг к пониманию генетической регуляции такого фундаментального процесса клеточного деления, как мейоз у высших растений. Сформулирована концепция генного контроля мейоза. Первый систематический поиск *mei*-мутаций был сделан на дрозофиле в 1968—1972 гг. Однако к настоящему времени эта коллекция исчерпала себя и ставится задача нового целевого поиска[7]. В итоге данной работы создана самая большая по репертуару и степени генетической и цитологической изученности коллекция *mei*-мутантов у высших организмов. Аналогичные успешные поиски и исследование *mei*-мутации проведены на ржи в лаборатории цитогенетики Петербургского университета[8]. Сопоставление этих данных свидетельствует о плодотворности сформулированной нами концепции генного контроля мейоза, в частности, поиска на ее основе ожидаемых типов мутаций, и установления расписания их действия. Серия транспозонных *mei*-мутаций, полученная в ходе данной работы, открывает перспективу молекулярно-генетического клонирования генов мейоза у высших организмов.

Очевидны прикладные аспекты проблемы генного контроля за поведением хромосом в мейозе и для селекции, и для медицины. Малейшее нарушение в расхождении хромосом в мейозе ведет к нарушению баланса генов, а затем к аномалиям развития и плодовитости, к тому, что называются хромосомными болезнями. Например, у человека сбой в мейозе, вызывающий задержку в расхождении 21-й пары хромосом, приводит к болезни Дауна. Хорошо известны печальные последствия аномального расхождения хромосом, определяющих пол. Массовое цитогенетическое обследование показало, что среди нарушений, вызывающих стерильность у мужчин, весома доля мутаций мейоза[9].

В наступившую эру генетической инженерии, когда пересадка фрагментов с нужными генами от хромосом одного вида к хромосомам другого стала реальной, никто заранее не может сказать, пройдет ли созданная генно-инженерная конструкция «отдел технического контроля» мейоза, будет ли она стабильно передаваться через гаметы. И лишь знание действия генов мейоза позволит контролировать этот процесс.

---

[7] Hawley R.S. // Genetics. 1993. V.135. P.613—618.

[8] Соснихина С.П., Федотова Ю.С., Смирнов В.Г., Михайлова Е.И., Богданов Ю.Ф. // Генетика. 1994. Т.30. № 8. С.1043—1056.

[9] Vidal F., Templado C., Navarro J. et al. // Human Genet. 1982. V.60. P.301—304.

Как клетка меняет свою организацию

Ю. М. Васильев

Юрий Маркович Васильев, доктор медицинских наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры вирусологии биологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова, руководитель лаборатории механизмов канцерогенеза Онкологического научного центра РАМН. Область научных интересов — цитоскелет; механизмы опухолевой трансформации и движений клетки.

КЛЕТОЧНЫЕ и молекулярные механизмы морфогенеза — одна из самых важных проблем современной биологии. Мы пока еще только-только начинаем разбираться в том, как гены, кодирующие структуру белков, приводят к построению специфических структур многоклеточного организма. Органы нашего организма строятся из нескольких основных тканей, каждая из которых образована определенными типами клеток, имеющими характерную форму и занимающими в ткани и органе строго закрепленные за ними места, которые клетки не покидают без специальных сигналов.

При анализе механизмов морфогенеза тканей и органов необходимо прежде всего изучить форму и движения разных типов клеток. Для этого клетки выделяют из организма и помещают по-одиночке в культуру (в сосуд с питательной средой), где они движутся по плоскому дну этого сосуда, так называемой подложке. Только в таких контролируемых условиях можно проанализировать индивидуальное поведение клеток и разобраться в его механизмах.

В качестве главного объекта исследований мы выбрали культивируемые клетки эпителиев. Эпителий, один из основных типов тканей, покрывает нашу кожу и слизистые оболочки в виде пластов из прочно спаянных друг с другом клеток — эпителиоцитов. Выросты эпителиальных пластов — основа всех железистых структур: молочных и слюнных желез, печени и многих, многих других. Замечено, что наиболее распространенные злокачественные опухоли человека возникают из генетически измененных эпителиоцитов, поэтому важность изучения клеток этого типа очевидна.

© Ю.М.Васильев

В культуре, как и в организме, эпителиоциты соединяются друг с другом в большие пласты и не склонны жить поодиночке. Это значительно затрудняет анализ поведения индивидуальных эпителиоцитов в культуре. Нам удалось выделить линии эпителиальных клеток, которые хорошо переносят одиночество, и на них исследовать поведение отдельных клеток.

Центральное место в экспериментах заняло изучение цитоскелета эпителиоцитов — динамичных белковых нитей, располагающихся в цитоплазме и ответственных за форму и движения клеток[1]. Существуют три основных типа цитоскелетных нитей: актиновые микрофиламенты, строящиеся из белка актина, микротрубочки — из тубулина, и промежуточные филаменты, состоящие из разных белков в зависимости от типа ткани. Кроме основных белков, в состав цитоскелета входят еще дополнительные белки, определяющие подвижность нитей. Расположение каждого из этих белков в клетке можно выявить точно при помощи реакций со специфичными для данного белка антителами. Применяя эти иммуноморфологические методы, мы использовали, в частности, полученные в нашей лаборатории моноклональные антитела к белкам цитоскелета.

Клетки движутся в организме и в культуре при помощи специальных динамичных отростков-псевдоподий, которые они вытягивают, прикрепляясь к подложке, и затем сокращают, подтягивая вперед тело клетки. Псевдоподии наполнены полимеризующимися заново актиновыми филаментами, которые и ответственны за их сокращение. Очевидно, что для анализа движений клеток сначала необходимо детально разобраться в динамике образования псевдоподий; в настоящее время это стало возможным благодаря появлению специальных видеомикроскопов с компьютерным усилением контраста, позволяющих наблюдать движения живых клеток и их частей с большим увеличением. Эта техника, усовершенствованная на средства гранта МНФ, стала, наряду с иммуноморфологией, методической основой наших опытов.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ И КОНТРПОЛЯРИЗАЦИЯ

Одиночная эпителиальная клетка в культуре обладает характерной организацией: она имеет форму уплощенного диска, на всем внешнем контуре которого постоянно образуются и сокращаются псевдоподии. Однако такая активность недостаточна для перемещения клетки как целого: она почти неподвижна, так как псевдоподии тянут ее во все стороны. На периферии этих клеток расположен характерный кольцевой пучок микрофиламентов (рис.1,*а*).

Иначе выглядят клетки другого тканевого типа — фибробласты соединительной ткани, которые резко вытянуты и образуют псевдоподии лишь на одном полюсе. Благодаря этому фибробласты способны ползти в определенном направлении. Именно это они делают и в культуре, и в организме при заживлении ран. Актиновые пучки у фибробластов не кольцевые, а прямые и вытянуты в направлении движения. Важно было выяснить, какие цитоскелетные системы определяют неполяризованную организацию эпителиоцита и ее отличия от фибробласта. Дело в том, что для возникновения полярной организации фибробласта необходимо присутствие в клетке неповрежденной системы микротрубочек. Если разрушить эту систему колцемидом — веществом, деполимеризующим микротрубочки, то клетки теряют способность к поляризации псевдоподиальной активности, не могут вытягиваться и сокращаться, двигая клетку в одном направлении. Такие клетки пытаются перемещаться в разных направлениях, но не могут запомнить ни одного. Эпителиоциты неполяризованы

[1] Васильев Ю.М. // Соросовский образовательный журн. 1996. № 2. С.36—43; Ченцов Ю.С. Общая цитология. (Введение в биологию клетки.) М., 1995.

и так, без всякого колцемида, хотя и обладают хорошо развитой системой микротрубочек. Может быть, эта система у них просто неактивна, и именно в этом заключается отличие эпителиоцитов от фибробластов? После ряда опытов мы убедились, что это не так: разрушение микротрубочек эпителиальных клеток колцемидом дезорганизует систему актиновых филаментов, приводя к исчезновению их кольцевого пучка и утрате правильной округлой формы внешнего контура клетки (рис.1,*б*). Видимо, псевдоподии образуются по кольцевому периметру клетки менее равномерно[2]. В обычной культуре эти изменения были не очень заметны, и потому мы задали фибробластам и эпителиоцитам более сложную задачу, решение которой позволило бы четко выявить их способность или неспособность к поляризации.

Известно, что фибробласты особенно хорошо вытягиваются и поляризуются, если прикрепляются не к плоской, а к цилиндрической подложке. Не окажутся ли даже эпителиоциты способны к поляризации на такой подложке? Мы использовали в качестве подложек специальные стеклянные цилиндры диаметром 30 мкм и посадили клетки обоих типов на их поверхность. Как и ожидалось, фибробласты вытянулись вдоль оси цилиндров, а актиновые пучки в них стали почти параллельными оси. Эпителиоциты, напротив, не вытянулись, а остались дисками и окутали цилиндры, при этом их актиновые пучки ориентировались не вдоль, а поперек осей этих цилиндров (рис.2,*а*,*б*). Описанные различия резко уменьшились после разрушения микротрубочек: эпителиоциты и фибробласты стали похожими друг на друга и по форме, и по ориентировке актиновых филаментов[3]. Таким образом, микротрубочки необходимы для поддержания правильной

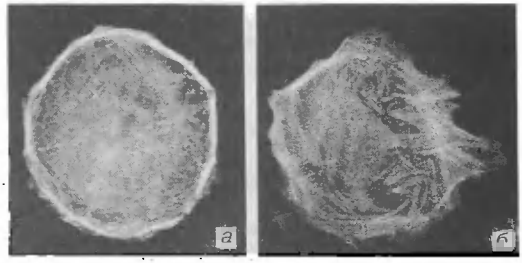


Рис.1. Микрофотографии нетрансформированных эпителиоцитов на плоской подложке: а — контрольная дисковидная клетка с кольцевым пучком актиновых филаментов по периферии, б — клетка, обработанная колцемидом. Разрушение микротрубочек привело к дезорганизации кольцевого пучка актина и исчезновению правильного округлого контура. Актин окрашен родаминфаллоидином.

кольцевой организации актиновой системы и формирования эпителиоцитом неполяризованного диска. Эту новую функцию микротрубочек мы назвали контрполяризацией.

Чем же объяснить этот парадоксальный результат? Почему микротрубочки у фибробластов и у эпителиоцитов действуют противоположным образом: у фибробластов обеспечивают поляризацию, а у эпителиоцитов — контрполяризацию? Видимо, дело здесь в разной конструкции систем микротрубочек: вероятно, микротрубочки эпителиоцитов распределены по периферии клетки равномерно по всем радиусам, тогда как у фибробластов они концентрируются в определенных направлениях. В пользу такого предположения говорят наши опыты с таксолом: это вещество дезориентирует микротрубочки, позволяя им выстраиваться произвольно во всех возможных направлениях вблизи всех краев клеток. В этих условиях фибробласт становится дисковидной клеткой с характерным кольцевым пучком актина, т.е. становится сходным по организации с нормальным эпителиоцитом[4]. Описанные различия в структурах систем микротрубочек эпителиоцитов и фибробластов — пока лишь пред-

[2] Gloushankova N.A., Lyubimova A.V., Tint I.S., Feder H.H., Vasiliev J.M. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1994. V.91. P.8597—8601.

[3] Svitkina T.M., Rovensky Y.A., Bershadsky A.D., Vasiliev J.M. // J. Cell Sci. 1995. V.108. P.735—745.

[4] Pletjushkina O.J., Ivanova O.J., Kaverina I.N., Vasiliev J.M. // Exp. Cell Res. 1994. V.212. P.201—208.

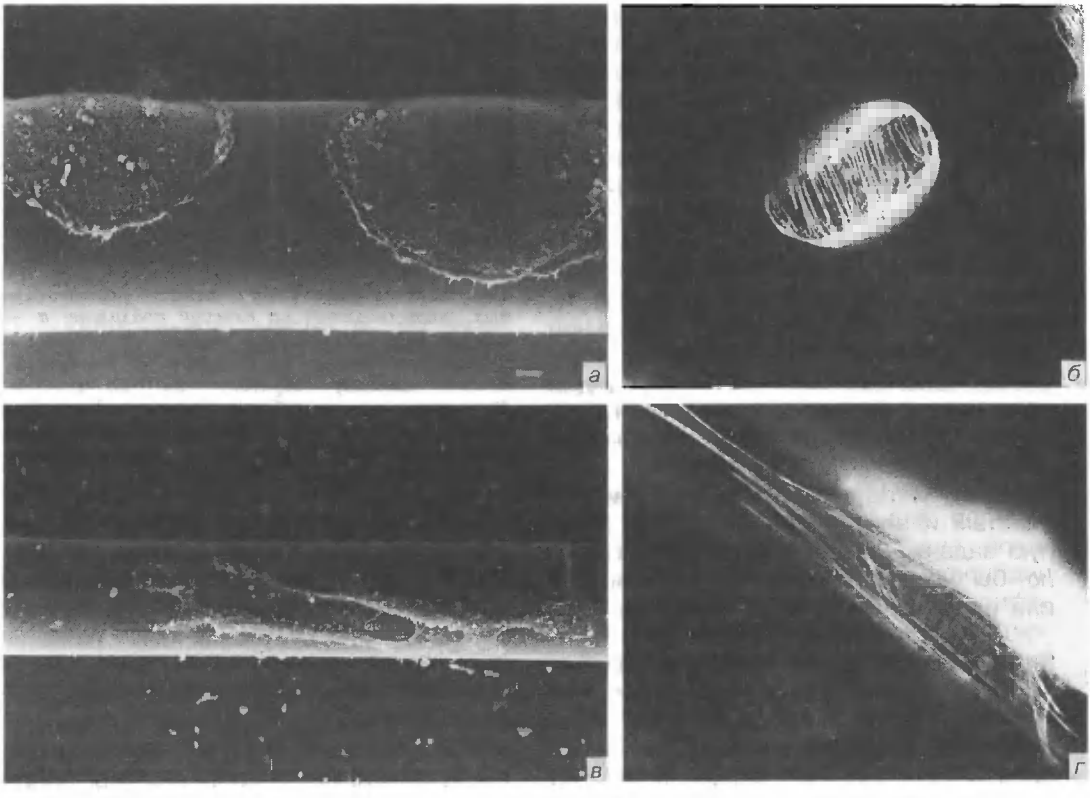


Рис.2. Микрофотографии клеток на цилиндрической подложке. Нетрансформированные эпителиоциты сохраняют форму дисков (а) и образуют пучки актиновых филаментов, перпендикулярные оси цилиндра (б). Трансформированные онкогеном N*-ras эпителиоциты имеют сильно вытянутую форму (в); их пучки актина ориентированы вдоль оси цилиндра (г).*

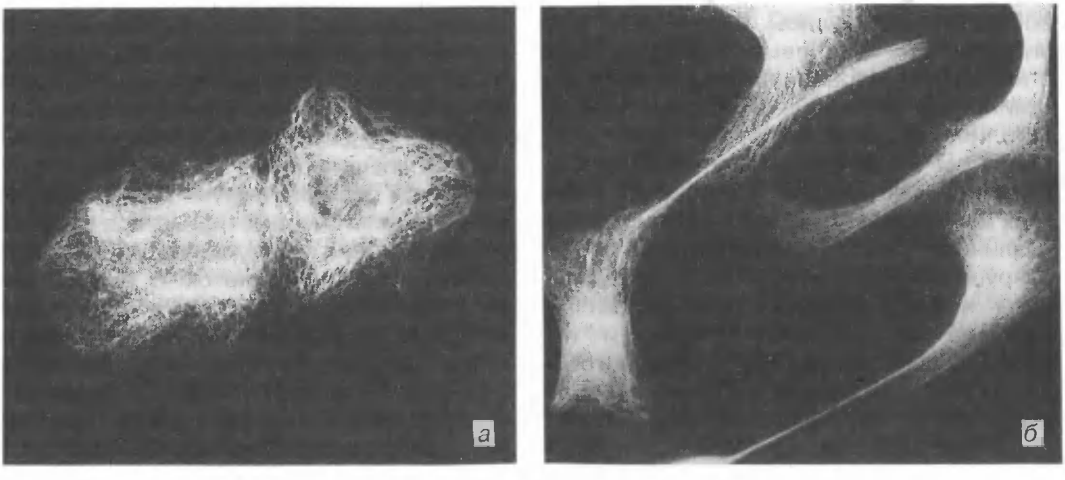


Рис.3. Микрофотографии клеток на плоской подложке: а — две контрполяризованные клетки, склеенные друг с другом, содержат густую сеть микротрубочек, ориентированных в разных направлениях. б — клетки обработанные СФ и приобретшие вытянутую поляризованную организацию (пучки микротрубочек в отростках). Окраска на белок микротрубочек — тубулин специфическим антителом.

положения и подлежат дальнейшему анализу.

ОТ КОНТРПОЛЯРИЗАЦИИ К ПОЛЯРИЗАЦИИ

Несколько лет тому назад М.Стокер показал, что некоторые клетки секретируют белки, которые при добавлении в среду культуры обратимо меняют организацию эпителиоцитов: дисковидные неполяризованные клетки становятся вытянутыми и подвижными[5]. Такие эпителиоциты перестают «склеиваться» друг с другом в пласты и разбегаются поодиночке по подложке (рис.3). Поэтому рассеивающий белок был назван Стокером скеттер-фактором (СФ; от английского to scatter — разбегаться, рассеиваться). Мы проанализировали динамику действия СФ на эпителиальные клетки и выяснили, что переход этих клеток из контрполяризованного в поляризованное состояние регулируется системой микротрубочек[6]. Особенно интересным оказалось действие СФ на клетки, растущие не на обычной плоской двумерной подложке, а внутри трехмерной сети из коллагеновых волокон. Созданная в культуре сеть схожа с сетями коллагеновых волокон, которые образуются в соединительной ткани организма и заполняют все промежутки между эпителиальными структурами. Оказалось, что в отсутствие СФ эпителиальные клетки, посаженные внутрь сети в культуре, никуда не движутся и не меняют своей формы. Если добавить СФ, то клетки вытягиваются и начинают двигаться. Однако, в отличие от поведения в обычной культуре, клетки в коллагене не разбегаются далеко друг от друга, а остаются связанными. В результате образуется система ветвящихся эпителиальных трубок (рис.4), врастающих в коллаген — это большие многоклеточные трубки (не путайте с микротрубочками цитоскелета!).

Таким образом, вне организма, в культуре удается воспроизвести один из важнейших процессов морфогенеза: рост трубчатых структур — процесс, который лежит в основе образования всех эпителиальных желез, а также образования всех кровеносных сосудов, которые являются трубками, выстланными похожим на эпителий эндотелием. Мы проанализировали этот эффект СФ и показали, что при врастании в коллаген лишь клетки на краю эпителиальной трубки становятся поляризованными и выпускают длинные отростки, которыми они прикрепляются к коллагену. Такие отростки затем тянут за собой вперед всю трубку из многих клеток, которые склеены друг с другом и не имеют удлиненной формы, т.е. находятся в обычном контрполяризованном состоянии. Формообразующие отростки краевых клеток богаты микротрубочками и актиновыми филаментами; при разрушении микротрубочек колцемидом отростки исчезают. Для образования этих отростков необходимо еще одно условие: присутствие в среде СФ. Если СФ удалить из среды, отростки перестают вытягиваться. При этом врастание трубок в коллаген прекращается. Таким образом, зависимая от микротрубочек поляризация краевых клеток, полярное образование ими отростков, оказалась ключевым процессом в механизме формирования эпителиальных органов и сосудов. В нашей системе этот процесс вызывается и поддерживается специальным белком СФ, который связывается со специфическими рецепторами клеточной мембраны и через систему белков, проводящих внутриклеточные сигналы, индуцирует полимеризацию актиновых филаментов и микротрубочек — молекулярную основу выпячивания отростков. Мы пока еще не знаем, почему лишь краевые клетки трубчатых структур чувствительны к вызываемому СФ образованию поляризованных отростков. Этот вопрос — важная тема для дальнейших экспериментов.

---

[5] Stoker M. // J. Cell. Physiol. 1989. V.139. P.565—569.

[6] Dugina V.B., Alexandrova A.Y., Lane K., Bulanova E., Vasiliev J.M. // J. Cell Sci. 1995. V.108. P.1659—1667.

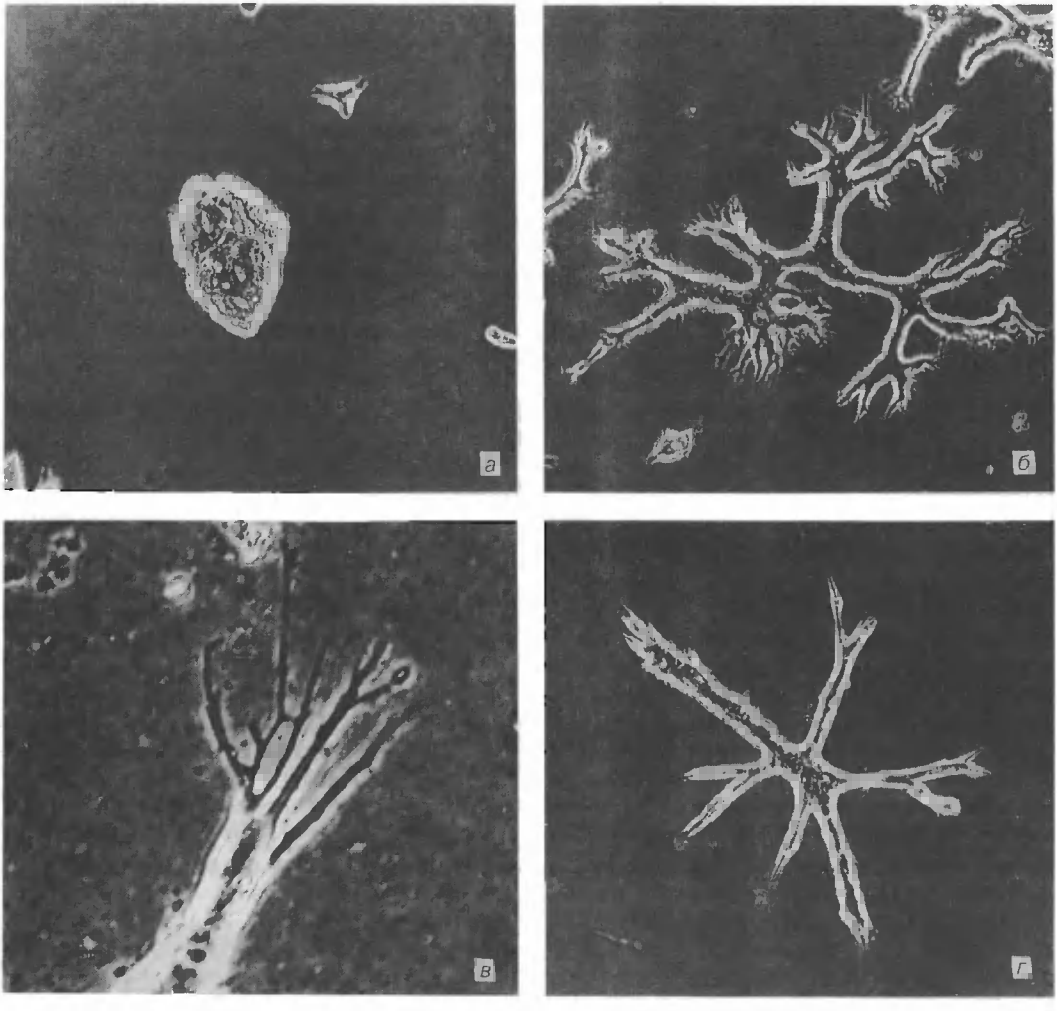


Рис. 4. ***Микрофотографии эпителиоцитов в коллагене: а — нетрансформированные клетки в среде без СФ (шар из многих клеток; врастания в коллаген нет); б — нетрансформированные клетки в среде с СФ (рост ветвящихся трубок в коллаген); в — отростки клеток на концах трубок, врастающие в коллаген (большое увеличение); г — трансформированные онкогеном N-*ras* клетки в среде без СФ (врастание трубок в коллаген).***

НОРМАЛЬНАЯ И ПАТОЛОГИЧЕСКАЯ ИНВАЗИИ ЭПИТЕЛИЯ В КОЛЛАГЕН

Инвазией называют врастание клеток одной ткани в другую ткань или орган. Основа возникновения злокачественных опухолей — появление и размножение в организме генетически измененных клеток. Особо опасное свойство этих клеток — их способность инвазировать окружающие ткани и даже другие органы. В чем механизм такого патологического инвазивного роста? Чем он отличается от инвазивного роста нормальных клеток, т.е. врастания трубок из эпителия или эндотелия в коллагеновую сеть, о котором мы говорили? При помощи методов генной инженерии мы получили эпителиоциты, содержащие введенный извне мутантный ген N-*ras* (один из онкогенов, вызывающих опухолевую трансформацию). Такие трансформированные клетки отличались от нетрансформированных клеток-предшественни-

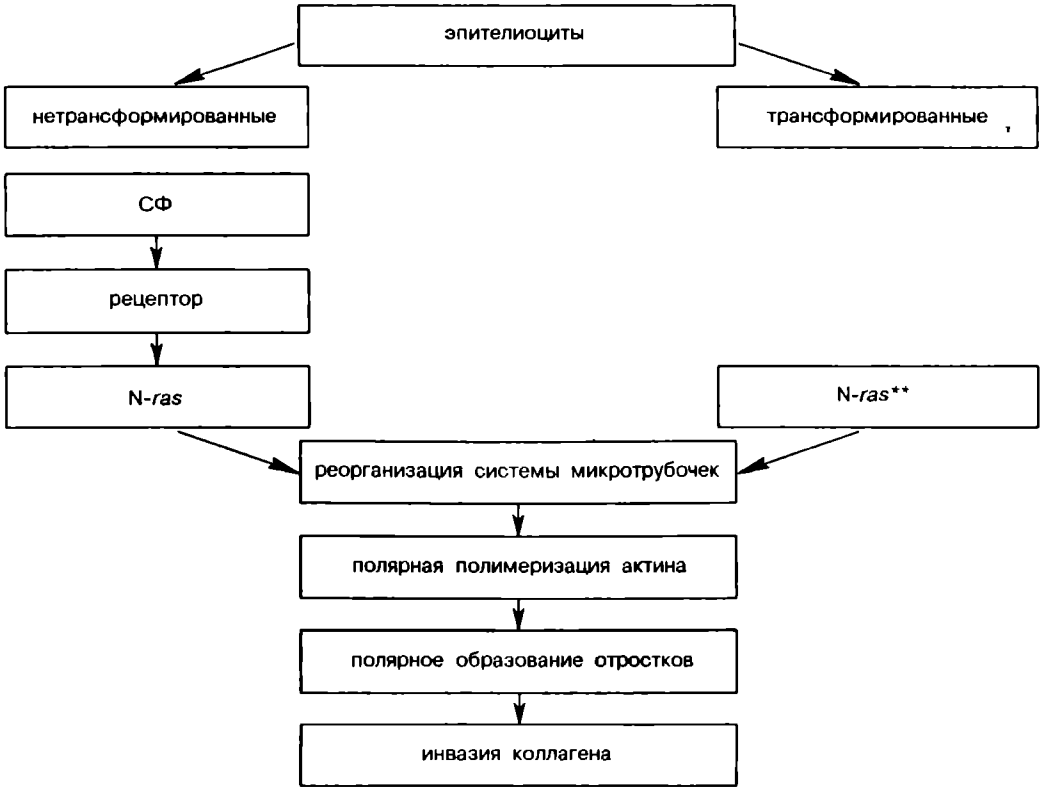


Рис.5. Схема возможных механизмов зависимой от СФ инвазии коллагена у нетрансформированных клеток (слева) и независимой от внешней стимуляции инвазии у трансформированных мутантным онкогеном N-ras** клеток.

ков по нескольким признакам[7]. На обычной плоской подложке и на цилиндрах эти клетки имели не дисковидную, а вытянутую поляризованную форму, а их актиновый цитоскелет был сходен со скелетом фибробластов (рис.2). В коллагеновом геле эти клетки образовали систему трубок, инвазировавших коллаген при помощи длинных отростков (рис.4). И особенности организации на плоской подложке, и способность к инвазии в коллагене оказались зависимыми от системы микротрубочек: эти особенности исчезали после обработки агентами, разрушающими эту систему. Таким образом, механизм инвазивного роста в коллаген оказался одинаковым и у нетрансформированных, и у трансформированных клеток. И там и там его основой было зависимое от микротрубочек превращение контрполяризованной организации в поляризованную. Однако у нетрансформированных клеток этот механизм включается лишь при воздействии на клеточную мембрану внешнего сигнального белка СФ; инвазия прекращается, когда СФ перестает действовать. Напротив, у трансформированных клеток механизм инвазии действует постоянно, независимо от внешних сигналов. Белок, кодируемый геном N-*ras*, в норме является частью сложной системы, проводящей сигналы с мембраны на внутренние системы клетки, в том числе и на цитоскелет. Видимо, мутантный белок N-*ras* все время

[7] Gloushankova N.A., Krendel M.F., Sirotkin V.A., Bonder E.M., Feder H.H., Vasiliev J.M., Gelfand I.M. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1995. V.92. P.5322—5325.

передает на цитоскелет «ложные» сигналы, вызывающие перестройку организации клеток и придающие этим клеткам способность к независимой от внешнего контроля инвазии (рис.5).

ЧТО ДАЛЬШЕ?

Таким образом, нашей группе удалось установить, что эпителиальные клетки могут иметь внутреннюю организацию двух качественно разных типов: контрполяризованную и поляризованную. Обе эти организации поддерживает и регулирует система микротрубочек.

Регуляторные белки, вызывающие переход эпителиальной клетки от одной организации цитоскелета к другой, делают эту клетку способной к инвазии соединительной ткани. Такая регулируемая инвазия — основа образования ряда важнейших органов в нормальном развитии. Опухолевая инвазия, как оказалось, имеет тот же механизм, но становится нерегулируемой, независимой от внешних сигналов.

Эти результаты открывают новые возможности для анализа молекулярных механизмов нормального развития и их патологических извращений. Назовем несколько из таких возможностей. Прежде всего, необходимо разобраться в функциях микротрубочек, изменения которых, как оказалось, играют главную роль в перестройках организации клеток. Известно, что к поверхности микротрубочек прикреплены специальные моторные молекулы, кинезин и динеин, которые могут двигать вдоль микротрубочки в разных направлениях основные клеточные органеллы: митохондрии, лизосомы и т.д. Мы предположили, что микротрубочки направляют в определенные участки цитоплазмы какие-то органеллы, которые вызывают или подавляют в определенных участках полимеризацию актина и образование псевдоподий, меняя, например, концентрацию АТФ или ионов. Эта гипотеза косвенно подтверждается результатами наших опытов: в клетку вводили антитела к кинезину; инактивация этого, связанного с микротрубочками, моторного белка приводила к тем же нарушениям организации, что и полное разрушение микротрубочек. Какие перемещаемые органеллы играют главную роль в регуляции формы и движений, мы пока не знаем. Работа в этом направлении продолжается. Другой важнейший вопрос — как нормальные и мутантные белки системы проведения сигналов меняют цитоскелет, в особенности организацию микротрубочек? Скорее всего речь идет о модификации, например фосфорилировании каких-то связанных с микротрубочками белков, но о каких конкретно белках идет речь, пока не известно. Когда будут получены ответы на эти и близкие вопросы, мы сможем, вероятно, найти способы регулировать перестройки системы микротрубочек, а следовательно, научимся контролировать нормальную и патологическую инвазию. Вопросы сформулированы — надо их решать.

Регуляция передачи сигнала от нейрона к нейрону

Л. Г. Магазаник

Лев Гиршевич Магазаник, профессор, заведующий лабораторией биофизики Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М.Сеченова РАН, член-корреспондент РАН, лауреат Государственной премии СССР (1989).

НЕРВНАЯ система любого из живых существ представляет собой сложно организованный конгломерат нервных клеток — нейронов. По мере расширения круга задач, которые нервной системе предстоит решать, число нейронов увеличивается в миллионы раз (от 10^3 у некоторых моллюсков до 10^{11} у человека), совершенствуется их специализация и многократно усложняются функциональные связи. Нейроны должны обмениваться информацией, т.е. потоками сигналов, носители которых (пока они распространяются в пределах многочисленных отростков одной нервной клетки) — электрические импульсы.

Для перехода сигнала из одной клетки в другую существуют специальные межклеточные соединения — синапсы. Хотя контактирующие участки нейронов тесно прилегают друг к другу, между ними, как правило, остается разделяющая их синаптическая щель, ширина которой — всего несколько десятков нанометров. Непременное условие успешной деятельности нейронов — их «территориальный суверенитет», а содружественную работу обеспечивают синапсы. Электрический импульс не может преодолеть без существенных потерь энергии даже такую короткую межклеточную дистанцию, поскольку встречает на своем пути среды, сильно различающиеся по сопротивлению электрическому току. Поэтому в большинстве случаев требуется преобразование информации из одной формы в другую, например из электрической в химическую, а затем — вновь в электрическую. Как же это происходит?

Синаптическая передача осуществляется последовательностью двух

© Л.Г.Магазаник

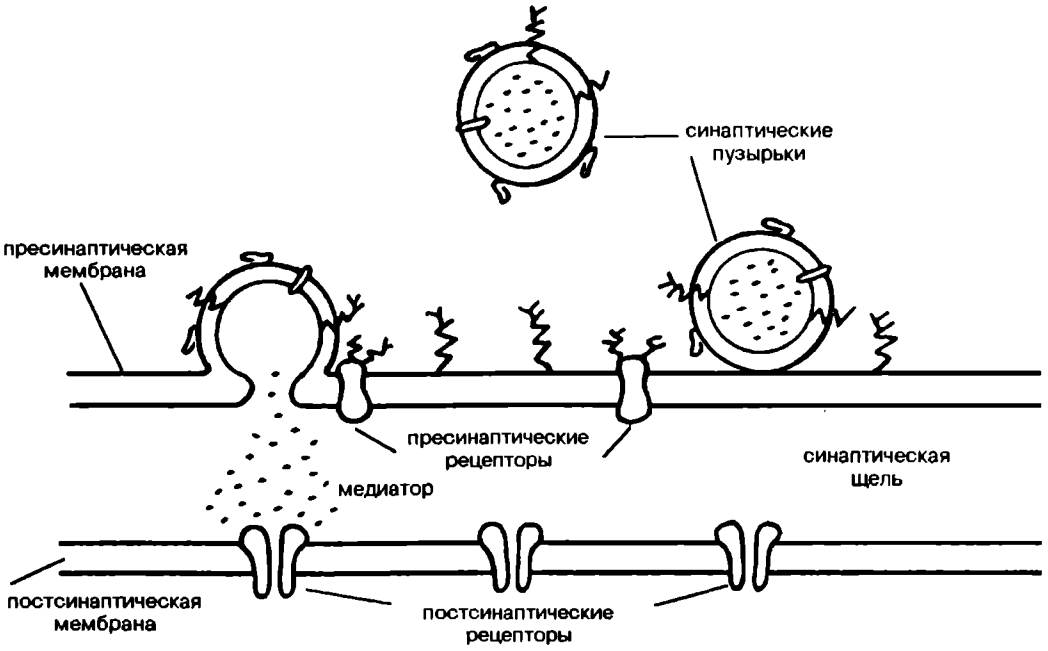


Схема синапса. Вверху — участок нервного окончания, ограниченный пресинаптической мембраной, в которую встроены пресинаптические рецепторы. Синаптические пузырьки внутри нервного окончания наполнены медиатором и находятся в разной степени готовности к его освобождению. Мембраны пузырьков и пресинаптическая мембрана содержат пресинаптические белки. Внизу — участок управляемой клетки, в постсинаптическую мембрану которой встроены постсинаптические рецепторы.

пространственно разобщенных процессов: пресинаптического по одну сторону синаптической щели и постсинаптического по другую. Окончания отростков управляющего нейрона, повинуясь пришедшим в них электрическим сигналам, высвобождают в пространство синаптической щели специальное вещество-посредник (медиатор). Молекулы медиатора достаточно быстро диффундируют через синаптическую щель и возбуждают в управляемой клетке (другом нейроне, мышечном волокне, некоторых клетках внутренних органов) ответный электрический сигнал. В роли медиатора выступает около десятка различных низкомолекулярных веществ: ацетилхолин (эфир аминоспирта холина и уксусной кислоты), глутамат (анион глутаминовой кислоты), ГАМК (гамма-аминомасляная кислота), серотонин (производное аминокислоты триптофана), аденозин и др. Они предварительно синтезируются пресинаптическим нейроном из доступного и относительно дешевого сырья, по большей части из аминокислот, и хранятся вплоть до использования в синаптических пузырьках, где, словно в контейнерах, заключены одинаковые порции медиатора (по нескольку тысяч молекул в одном пузырьке).

В настоящее время хорошо известны основные этапы процесса освобождения медиатора. Нервный импульс, т.е. электрический сигнал, возникает в нейроне, распространяется по его отросткам и достигает нервных окончаний. Его преобразование в химическую форму начинается с открывания в пресинаптической мембране кальциевых ионных каналов, состояние которых управляется электрическим полем мембраны. Теперь роль носителей сигнала берут на себя ионы кальция. Они входят через открывшиеся каналы внутрь нервного окончания.

Резко возросшая на короткое время примембранная концентрация ионов кальция активизирует молекулярную машину освобождения медиатора. Синаптические пузырьки уже находятся вблизи их последующего слияния с наружной мембраной, появление кальция побуждает их мембраны слиться, и, наконец, содержимое пузырьков выбрасывается в пространство синаптической щели.

Синапсы выполняют функцию усилителей нервных сигналов на пути их следования. Эффект достигается тем, что один относительно маломощный электрический импульс освобождает сотни тысяч молекул медиатора, заключенных до того во многих синаптических пузырьках. Залп молекул медиатора синхронно действует на небольшой участок управляемого нейрона, где сосредоточены постсинаптические рецепторы — специализированные белки, которые преобразуют сигнал теперь уже из химической формы в электрическую.

Синапсы — удобный объект регулирования потоков информации. Уровень усиления сигнала при его передаче через синапс можно легко увеличить или уменьшить, изменяя количество освобождаемого медиатора, вплоть до полного запрета на передачу информации. Теоретически это можно осуществить путем направленного воздействия на любой из этапов высвобождения медиатора.

Именно на выяснение механизмов управления синаптической передачей и были устремлены усилия исследователей в лаборатории биофизики Института эволюционной физиологии и биохимии им.И.М.Сеченова РАН (Санкт-Петербург). Их эффективному проведению способствовала поддержка Международного научного фонда, позволив, в частности, оперативно приобрести современные приборы и разнообразные химические реактивы.

В качестве подходящего объекта исследования выбрали мышцу лягушки, изолированную вместе с управляющим нервом. Такой препарат обладает многими достоинствами: однотипностью синапсов, удобством проведения разнообразных и достаточно тонких экспериментов, способностью изолированных тканей длительное время сохранять свою жизнеспособность. Поскольку основные свойства синапсов в разных тканях весьма сходны, полученные сведения можно использовать для анализа синаптической передачи в мозгу.

Свойства нервно-мышечных синапсов диктовали и выбор методов регистрации. Одиночный акт передачи сигнала через синапс длится всего несколько тысячных долей секунды (миллисекунд), поэтому для его регистрации применимы только электрические измерения. С этой целью изолированный препарат помещают в ванночку с солевым раствором, воспроизводящим плазму крови лягушки. Нерв укладывают на раздражающие электроды, а в мышечное волокно, в непосредственной близости с синапсом, вводят внутриклеточные микроэлектроды. Последние представляют собой тонкие стеклянные трубки, диаметр вытянутого кончика которых не превышает одного-двух микрометров. Микроэлектрод, заполненный концентрированным раствором хлористого калия, может служить для измерения разности потенциалов между внутренностью мышечного волокна и его поверхностью. Специальная система усилителей биоэлектрических сигналов позволяет одновременно регистрировать быстрые изменения электрического тока, вызванные действием медиатора, и удерживать потенциал на мембране мышечного волокна на заданном уровне. Электрические синаптические ответы затем можно вывести на экран осциллографа, записать на магнитную ленту либо после преобразования в цифровую форму проанализировать на компьютере. Такая система позволяет экспериментатору оценивать изменения синаптической передачи в ходе опыта и оперативно изменять его ход в зависимости от наблюдаемого результата.

Из работ наших предшественников уже было известно, что окончания

двигательного нерва, управляющего сокращениями мышцы, чувствительны к некоторым химическим агентам, способным изменять количество освобождаемого медиатора. На поверхности пресинаптической мембраны нервных окончаний тоже имеются рецепторы, белковые «датчики», которые опознают действующий на них агент и запускают процесс регулирования. Нам предстояло выяснить, как это происходит, каким образом химический сигнал, воспринятый нервным окончанием, влияет на освобождение медиатора. Для этого надо было проследить всю цепочку молекулярных процессов — от воздействия химического агента на рецептор до конечной мишени его влияния.

Прежде всего, какие же химические агенты модулируют освобождение медиатора? Наибольший интерес для нас представляло пресинаптическое действие самих медиаторов. Биологический смысл использования одних медиаторов для регуляции освобождения других очевиден. Такой механизм обеспечивает вмешательство третьего нейрона в «разговор» первых двух: выделяемый им медиатор действует на нервное окончание управляющего нейрона и регулирует освобождение медиатора, предназначенного для передачи сигнала управляемому нейрону. Здесь, как правило, используются медиаторы разной химической природы: один для передачи по основному пути, а другой — для ее модуляции. Но медиатор может и сам управлять своим освобождением. Если из нервного окончания освобождается избыточное количество медиатора, это в конце концов приводит к нерациональным энергетическим затратам на синтез необходимых веществ и на восстановление режима готовности к новому рабочему акту. Наконец, перевозбуждение может стать губительным для управляемой клетки. Значит, необходима саморегулирующаяся система, работающая с отрицательной обратной связью. Действительно, медиатор в нервно-мышечных синапсах, ацетилхолин, будучи выброшен в синаптическую щель, не только выполняет свою прямую обязанность — передать информацию (например, двигательный приказ мышечному волокну, действуя на его постсинаптические рецепторы), но и способен регулировать собственное освобождение, действуя через пресинаптические рецепторы нервных окончаний.

Принципиальная схема регуляции должна выглядеть следующим образом: медиатор действует на пресинаптический рецептор; изменения состояния рецептора передаются через некие промежуточные стадии на системы, способные влиять на освобождение медиатора, — в результате вероятность этого события снижается.

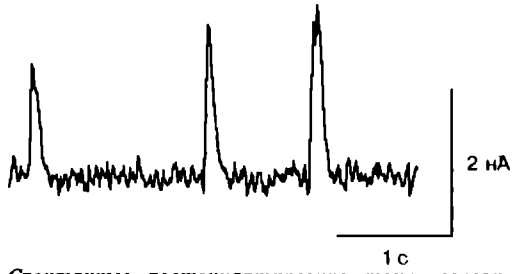
Нужно было ответить на целый ряд вопросов, логически связанных друг с другом. Прежде всего определить, какой тип пресинаптического рецептора вовлечен в процесс саморегулирования. Оказывается, природа и здесь проявила способность к экономному и рациональному решению проблемы. Для передачи двигательных сигналов используется один тип рецептора, рассчитанный на быстрое их преобразование, а для регулирования — рецепторы другого типа, работающие гораздо медленнее, но зато обеспечивающие высокий коэффициент усиления сигнала. Несмотря на то, что оба типа рецептора реагируют на один и тот же медиатор (ацетилхолин), в эксперименте удается использовать различия в их чувствительности к синтезированным химическим аналогам ацетилхолина и таким образом избирательно действовать на постсинаптические (пусковые) или на пресинаптические (регулирующие) рецепторы.

Следующая проблема: где расположена клеточная система, способная непосредственно модулировать освобождение медиатора, в пресинаптической мембране или внутри нервного окончания? Пресинаптическая мембрана, действительно, содержит элементы, от деятельности которых зависит реализация сигнала. Это пути, используемые ионами калия и кальция для прохождения через клеточную мембра-

ну, — соответственно калиевые и кальциевые ионные каналы. Может быть, активация пресинаптических рецепторов изменяет потоки этих ионов и тем самым модулирует освобождение медиатора?

Проведенные эксперименты отвергли это предположение. Оказалось, что активация пресинаптических рецепторов в равной мере подавляет освобождение медиатора, как вызванное раздражением двигательного нерва (оно, действительно, зависит от состояния кальциевых и калиевых каналов), так и спонтанное, в механизме которого роль этих каналов незначительна. Если в эксперименте кальциевые и калиевые каналы заблокированы, то регулирующее действие медиатора сохраняется. Более того, возможность этого воздействия не зависит от концентрации кальция внутри нервного окончания. Даже после проникновения веществ, способных связывать калий и тем самым поддерживать его концентрацию внутри на очень низком уровне, спонтанное освобождение не только сохраняется, но и по-прежнему регулируется пресинаптическими рецепторами.

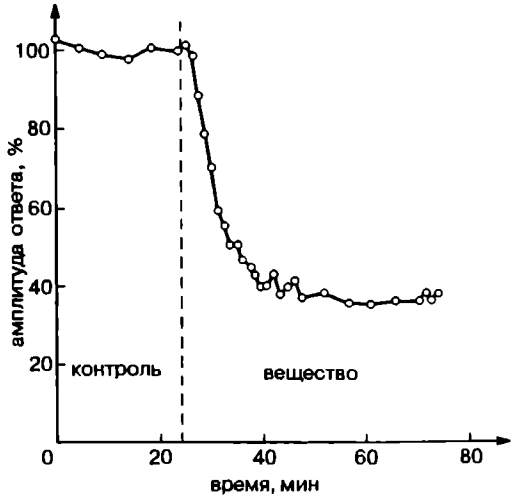
Эти результаты привели нас к важному выводу: конечную мишень регулирования надо искать внутри нервного окончания, в структурах, непосредственно ответственных за освобождение медиатора. Но прежде необходимо понять: как активированный пресинаптический рецептор передает эстафету дальше, внутрь клетки, каков механизм усиления этого сигнала? Типичный для большинства живых клеток способ решения подобной задачи состоит в сопряжении рецептора, расположенного на поверхности мембраны клетки, с универсальным передаточным устройством, внутриклеточным специализированным белком, который назвали Г-белком. Этот белок составлен, как правило, из нескольких субъединиц, образующих единый комплекс. Активация рецептора приводит к его обратимому разделению, и одна из составных частей обретает относительную свободу передвижения. Это



Спонтанные постсинаптические токи, генерируемые мышечным волокном. Каждый сигнал — ответ на действие порции медиатора, освободившегося из синаптических пузырьков.

позволяет ей взаимодействовать с целым рядом клеточных устройств: активировать или подавлять работу транспортных систем клетки, регулировать деятельность внутриклеточных ферментов и т.п. Таким образом, регулирующий сигнал в результате многократного усиления в конце концов изменяет определенную клеточную функцию.

Используется ли этот типичный механизм в исследуемом нами случае? Известно, что часть Г-белков описанного выше типа чувствительна к некоторым токсинам, продуцируемым микробами, например коклюшной палочкой или холерным вибрионом. Наши эксперименты дали отрицательный ответ: ни коклюшный, ни холерный токсины не влияли на регуляцию освобождения медиатора. В то же время ряд косвенных признаков позволяли предполагать участие Г-белков в этом процессе, например, пресинаптическое действие медиатора оказалось сильно зависящим от температуры: при снижении температуры раствора на 10 градусов оно исчезало, хотя освобождение медиатора сохранялось. Это было прямым указанием на то, что в процесс передачи регулирующего сигнала вовлечены реакции, требующие поступления энергии извне, например ферментативные. Можно было предполагать также участие нечувствительных к токсинам Г-белков, которые располагаются непосредственно на поверхности мембраны синаптических пузырьков.



Эксперимент на мышце лягушки, демонстрирующий угнетение освобождения ацетилхолина из двигательных нервных окончаний в результате действия одного из его аналогов на пресинаптические рецепторы. Видно, что постсинаптические токи, вызванные периодическим раздражением нерва, при действии вещества значительно уменьшают свою амплитуду по сравнению с контрольным периодом.

Дальнейшее выяснение конкретного объекта регулирования предусматривает анализ возможного участия белковых компонентов, из которых собрана молекулярная машина освобождения медиатора. И тут мы подходим к проблеме наиболее трудной как для исследования, так и для непротиворечивого изложения. Дело в том, что существование такой машины и ее многокомпонентность очевидны. И хотя эту задачу пытаются решить представители самых разных направлений современной нейробиологии, пока видны лишь только контуры общей схемы. Основы подхода предложили нейрохимики. Они детально исследовали белки, которые можно обнаружить только в нервных окончаниях, справедливо полагая, что молекулярная машина освобождения медиаторов построена из них. Таких белков набралось более десятка. Затем к делу подключились иммунохимики. Вводя выделенные индивидуальные белки в кровь животных (кроликов, мышей), вызывали выработку у них защитных антител, способных избирательно взаимодействовать с определенным белком или только с его участком. Такие антитела могут служить точным и высокочувствительным инструментом исследования.

Специалисты по электронной микроскопии использовали антитела для картирования пресинаптических белков, т.е. выявления их расположения в нервном окончании в разных стадиях функционирования. Сейчас большие надежды возлагаются на искусство генетиков. Обнаружив участки генома, ответственные за воспроизведение того или иного белка, можно вывести линию и плодовой мушки-дрозофилы и мышей-мутантов, лишенных этого белка. А далее дело физиологов определить, в чем и насколько изменилась работа молекулярной машины, какую роль играла в ней удаленная деталь. Это долгая и кропотливая работа, дающая подчас самые неожиданные результаты. Нобелевский лауреат, биохимик А.Сент-Дьерди когда-то сравнивал исследователя с ребенком, который стремится разобрать подаренную игрушку на составные части, чтобы понять, как она устроена, хотя лучше бы научиться ее собирать. Пожалуй, сегодня исследователи механизмов освобождения только приступают к этому более продвинутому этапу познания. Полученные нами данные о том, что влияние пресинаптических рецепторов может быть адресовано непосредственно внутриклеточным компонентам, открывают новую перспективу в изучении механизмов как освобождения медиатора, так и регулирования функциональных связей между нейронами. Действительно, если, лишив животное определенного пресинаптического белка, удастся устранить возможность регулирования, то будет обнаружена искомая конечная мишень. У нас уже накопились косвенные улики, позволяющие подозревать один из таких белков. Проверка этой гипотезы — предмет будущих исследований.

Рекомендуемая литература

1. **Куффлер С., Николс Дж.** ОТ НЕЙРОНА К МОЗГУ. М.: Мир, 1979.
2. **Кэндел Э.** КЛЕТОЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЕДЕНИЯ. М.: Мир, 1980.
3. **Скок В.И., Селянко А.А., Деркач В.А.** НЕЙРОНАЛЬНЫЕ ХОЛИНОРЕЦЕПТОРЫ. М.: Наука, 1987.
4. **Авдонин П.В., Ткачук В.А.** РЕЦЕПТОРЫ И ВНУТРИКЛЕТОЧНЫЙ КАЛЬЦИЙ. М.: Наука, 1994.

КОРОТКО

•

25 сентября 1996 г. панамское грузовое судно, перевозившее 35 т мазута и несколько тысяч тонн зерна, село на мель у берегов Корсики. В образовавшуюся в трюме пробоину вода стала поступать в отсеки с зерном. В результате брожения начал выделяться взрывоопасный метан; от смешения с мазутом и машинным маслом вещество приобрело молочный цвет. Создалась угроза островному заповеднику Лавецци (Lavezzi). Официально было заявлено, что судно не может сойти с мели из-за плохой погоды, а на самом деле судовладелец просто отказался оплачивать работы по снятию с мели и откачиванию воды, поскольку их стоимость превышала стоимость самого судна.

Science et Vie. 1997. № 953. P.25 (Франция).

•

Всемирная метеорологическая организация опубликовала в апреле 1997 г. отчет международной группы экспертов, возглавляемой Э.Хендерсон-Селлерс (A.Henderson-Sellers; Королевский Мельбурнский технологический институт, Австралия). Он посвящен последствиям глобального потепления климата. Из отчета, в частности, следует, что в ближайшие 50—80 лет мощь тропических циклонов возрастет на 10—20%, что будет обусловлено усилением атмосферных конвекционных потоков в связи с потеплением поверхностных слоев Мирового океана. Однако циклоны, по мнению экспертов, не станут более частыми, чем ныне, и не будут выходить за пределы тропических областей.

New Scientist. 1997. V.154. № 2078. P.13 (Великобритания).

•

В графстве Дербишир (округ Пик, Англия) горные инженеры на разрабатываемом склоне карьера случайно натолкнулись на древнее сооружение, которое, по предварительным оценкам, следует отнести к эпохе неолита. Оно представляет собой ритуальную платформу (an excarnation platform), куда укладывалось тело умершего на растерзание хищным птицам и диким зверям. Как полагают, это лишь вторая подобная находка на территории Англии.

Одновременно с обнаружением ритуальной платформы были найдены два кургана бронзового века. Из-за постоянной угрозы осыпи склона археологические находки перенесены в укрытие для тщательного обследования.

The Geographical Magazine. January 1997. P.9 (Великобритания).

Что видит и слышит дельфин?

А. Я. Супин, А. М. Масс

Александр Яковлевич Супин, доктор биологических наук, заведующий лабораторией эволюции сенсорных систем Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова. Область научных интересов — нейрофизиология мозга морских млекопитающих и человека. В последнее время уделяет особое внимание эхолокации дельфинов.

Алла Михайловна Масс, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Занимается сравнительной нейрофизиологией и нейроморфологией зрительной системы наземных и водных млекопитающих.

Лет двадцать тому назад дельфины были в большой моде. Не было недостатка в фантастических спекуляциях во всем, что касалось этих животных. Со временем мода прошла, и спекуляции заслуженно забыты. А что же осталось? То, что привлекало ученых с самого начала. Дельфины целиком приспособлены к жизни в воде, все системы их организма (органы чувств, дыхание, кровообращение и многое другое) работают в совершенно иных условиях, чем аналогичные системы, например человека.

Среди всех систем организма дельфина нас привлекли зрительная и слуховая. Дело в том, что, проводя всю жизнь в воде, дельфин все же вынужден постоянно всплывать на поверхность для дыхания. Поэтому его зрение должно быть достаточно хорошим и под водой, и в воздухе, а это непросто, поскольку оптические свойства воздуха и воды совершенно различны. С другой стороны, каким бы хорошим ни было зрение дельфина, его возможности ограничены из-за невысокой прозрачности воды. Поэтому основные сведения об окружающей обстановке дельфин получает с помощью слуха. При этом он использует активную локацию: слушает эхо, возникающее при отражении издаваемых им звуков от окружающих предметов. Эхо дает ему точные сведения не только о положении предметов, но и об их величине, форме, материале. Иными словами, слух позволяет дельфину воспринимать окружающий мир не хуже, а даже лучше, чем зрение.

ЧТО МОЖЕТ УВИДЕТЬ ДЕЛЬФИН

Обычно чтобы это определить, проводят эксперименты с условными

© А.Я.Супин, А.М.Масс

рефлексами[1]. Но не всегда есть условия для выполнения таких исследований на дельфинах, а тем более на их более крупных сородичах — китах. Задачу помогает решить морфологическое изучение глаза, в частности строения сетчатки, с которым связаны особенности зрения. Фоторецепторы и нервные клетки распределены в сетчатке неравномерно. Например, у человека и приматов существует участок около 0.5 мм^2, называемый желтым пятном. В этой области плотность рецепторов максимальна. Именно эта область имеет наибольшую остроту зрения и представлена в высших отделах мозга наиболее подробно, благодаря чему мы видим предмет детально. Подобные области наилучшего видения (ОНВ) в той или иной форме существуют у всех животных.

Размер, форма, расположение ОНВ зависят от образа жизни животного и положения глаз на голове. У человека и животных с фронтальным расположением глаз (у приматов, хищных) эта область представлена в виде пятнышка в центральной части сетчатки, у животных с глазами, расположенными по бокам головы (у грызунов, копытных), эта зона выглядит в виде горизонтально вытянутой полоски.

До недавнего времени считалось, что у китов и дельфинов ОНВ отсутствует, однако по нашим данным ОНВ есть и у морских млекопитающих, в том числе у дельфинов и китов.

Острота зрения животных может быть рассчитана по плотности ганглиозных клеток сетчатки[2]. Эти нервные клетки расположены в сетчатке глаза и производят предварительную обработку информации, приходящей от светочувствительных рецепторов. Роль ганглиозных клеток в процессах зрения очень велика, и, в частности, способность сетчатки глаза различать мелкие детали изображения зависит от того, насколько плотно расположены в ней эти клетки: чем их больше на единицу площади, тем более мелкие детали изображения могут различаться. Подсчитывая плотность, т.е. количество ганглиозных клеток на единицу площади, можно оценить остроту зрения в той или иной части поля зрения, в том числе и найти ОНВ.

Объектом нашего исследования стал хорошо известный и исследователям, и зрителям океанариумов черноморский дельфин афалина (*Tursiops truncatus*). Данные о его остроте зрения особенно важны как для проведения экспериментальных исследований, так и для создания необходимых условий для содержания этих уникальных животных в океанариумах. Более 10 лет мы собирали морфологический материал от погибших (случайно или в результате болезни) дельфинов. Это позволило получить достаточное количество препаратов сетчатки, чтобы провести полноценное исследование[3].

Если сетчатку целиком извлечь из глазного бокала, а затем наклеить на предметное стекло и окрасить специальным красителем, то получается препарат, который можно обследовать под обычным световым микроскопом и подсчитать количество и плотность расположения ганглиозных клеток. Таким образом составлялась топографическая карта сетчатки, показывающая, как распределены в ней ганглиозные клетки.

Обнаружилась удивительная картина. В отличие от всех наземных млекопитающих, имеющих одну ОНВ, в сетчатке дельфина существуют две такие области. Расположены они на экваторе сетчатки. Одна из них находится в задней части, т.е. в той, которая смотрит вперед (ведь оптическая система глаза переворачивает изображение); другая — в передней, которая смотрит назад. Эти области расположены довольно далеко от

---

[1] Herman L.M., Peacock M.F., Yunker M.P., Madsen C.J. // Science. 1975. № 189. P.650—652.

[2] Pettigrew J.D., Dreher B., Hopkins C.S., McCall M.J., Brown M. // Brain. Behav. Evol. 1988. № 32. P.39—56.

[3] Mass A.M., Supin A.Ya. // Brain Behav. Evol. 1995. № 45. P.257—265.

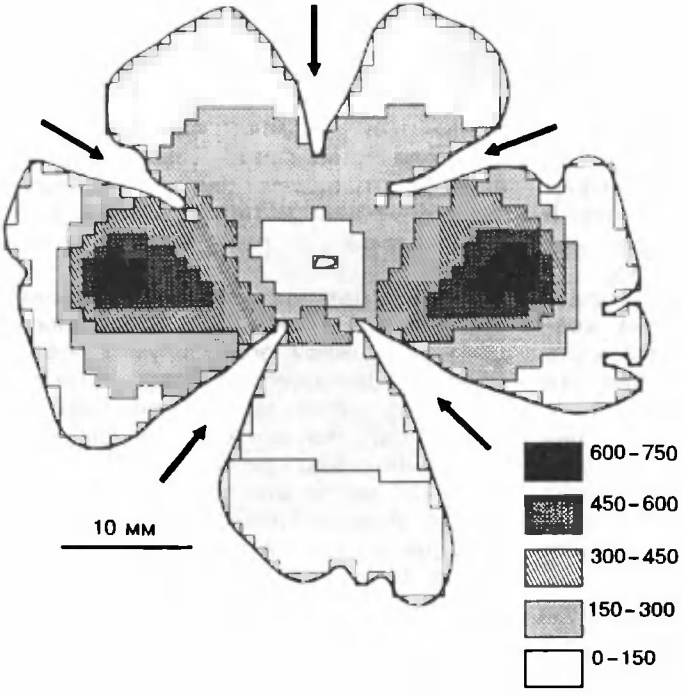


Рис. 1. Топографическая карта распределения плотности ганглиозных клеток в сетчатке дельфина афалины. Плотность клеток условно обозначена штриховкой в соответствии со шкалой справа (количество клеток на 1 мм^2). Слева — передний, справа — задний, сверху и снизу — верхний и нижний полюсы сетчатки соответственно. Стрелками показаны разрезы, сделанные, чтобы наклеить сетчатку на плоское стекло.

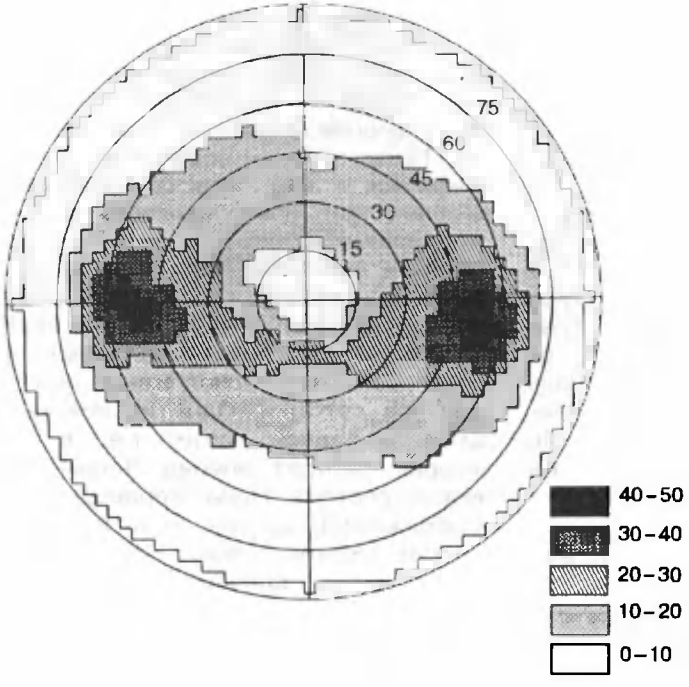


Рис. 2. Непрерывная сферическая карта распределения плотности ганглиозных клеток сетчатки афалины в полярных координатах. Плотность клеток указана в их количестве на 1 град^2. Цифры около концентрических кругов — расстояние от центра сетчатки в угловых градусах.

центра сетчатки, на расстоянии 15—17 мм. Плотность ганглиозных клеток оказалась примерно одинаковой в обеих зонах: около 670 клеток/мм^2.

На полученной карте (рис.1) представлена вся сетчатка, развернутая на плоскости. Для того, чтобы наклеить сферическую сетчатку на плоское стекло, пришлось сделать на ней несколько радиальных надрезов. А чтобы оценить, как организовано поле зрения дельфина, полученная карта «сшивается» по линиям разреза с помощью специальной компьютерной программы. В результате получается непрерывная сферическая карта распределения ганглиозных клеток в полярных координатах (рис.2). Зная радиус сетчатки (14.5 мм), мы рассчитали, что максимальная плотность составляет 43 клетки/град^2. Это значит, что среднее угловое расстояние между соседними клетками составляет примерно 9′. Острота зрения определяется именно этим угловым расстоянием. Значит, острота зрения дельфина в обеих ОНВ (и в передней, и в задней) — около 9′.

Эти расчеты были, сделаны с учетом оптических свойств воды. А какова острота зрения дельфина в иной среде? По законам оптики, под водой изображение предмета на сетчатке примерно на треть больше, чем изображение того же предмета, расположенного на том же расстоянии, но в воздухе. Поэтому в воздушной среде способность сетчатки дельфина различать изображения немного хуже, чем в воде: она составляет 12′.

Выявленная картина топографии сетчатки китообразных с двумя ОНВ совершенно необычна и не имеет аналогов ни у одного из наземных млекопитающих. Это особенно интересно, если учитывать, что дельфины и киты — вторичноводные животные (их предки жили когда-то на суше). Но каков смысл наличия у дельфина двух ОНВ вместо одной? Оптическая система, рассчитанная на работу в воздухе, дает плохое изображение пбд водой, и наоборот. Дельфины же хорошо видят и под водой, и на воздухе. Не исключено, что такая универсальность зрения дельфинов и связана с наличием в их глазе двух ОНВ: на одной из них оптика глаза обеспечивает хорошее изображение в воде, а на другой — преимущественно в воздухе. Это предположение подтверждается многими наблюдениями. Когда дельфин хочет что-то рассмотреть под водой, он обычно поворачивается к объекту боком (одним глазом), т.е. использует задне-боковую ОНВ. А чтобы увидеть предмет в воздухе, дельфин располагается к нему носом (смотрит двумя глазами), т.е. использует переднюю ОНВ.

Интересно было узнать, характерно ли такое необычное строение глаза только для афалины или для других дельфинов тоже? К настоящему времени сведения о строении сетчатки получены для нескольких видов дельфинов[4]. У всех у них сетчатка глаза содержит две ОНВ. И острота зрения тоже более или менее сходная: 8—14′. Это хуже, чем у многих наземных животных: например, у человека и приматов острота зрения около 1′, а у кошки 5—6′. Но для подводных условий, где прозрачность среды невелика, этого вполне достаточно. Это доказывают и наблюдения за животными, содержащимися в океанариумах: они прекрасно знают своих тренеров, могут совершать точные прицельные прыжки и без единого промаха доставать до предметов, помещенных на большой высоте.

Исключение составил только амазонский дельфин (*Inia geoffrensis*) — удивительное животное, обитающее не в морях, а в реках Южной Америки. Вода там очень мутная, почти непрозрачная, и глаза амазонского дельфина приспособились к зрению на очень коротком расстоянии (дальше все равно ничего не видно) и при низкой освещенности (мутная вода сильно поглощает свет). У этого дельфина

---

[4] Dral A.D.G. // Aquatic Mammals. 1983. № 10. P.57—68; Mass A.M. Supin A.Ya. // Aquatic Mammals. 1986. № 12. P.95—102; Murayama T., Somiya H., Aoki I., Ishii T. // Marine Mammal Science. 1995. № 11. P.136—149.

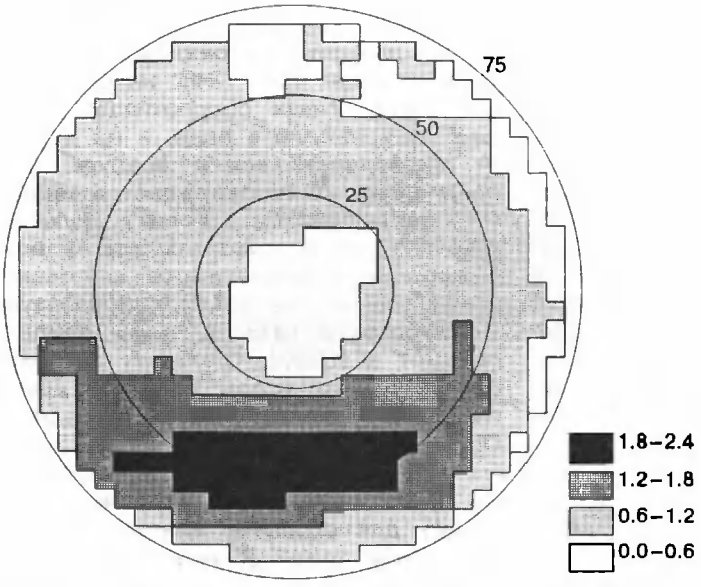


Рис. 3. Сферическая карта сетчатки амазонского дельфина.

только одна ОНВ, но не в центре сетчатки, как у наземных животных, а в нижней ее части — той, которая смотрит вверх (рис.3). Только там, в верхнем слое воды, достаточно света, чтобы хоть что-нибудь разглядеть. Естественно, у амазонского дельфина очень низкая острота зрения[5] (45′). Но большая острота зрения и не нужна, если смотреть на предметы, удаленные не далее, чем на десятки сантиметров.

Итак, используя морфологическое исследование сетчатки, нам удалось не только оценить разрешающую способность зрения дельфинов, но и выявить необычную для млекопитающих организацию ОНВ и хотя бы отчасти понять, что представляет собой зрительный мир дельфина.

ЧТО РАЗЛИЧАЕТ СЛУХ ДЕЛЬФИНА

То, что дельфины имеют необычайно развитый слух, известно уже десятки лет. Объемы тех отделов мозга, которые заведуют слуховыми функциями, у дельфинов в десятки(!) раз больше, чем у человека (при том, что общий объем мозга примерно одинаков). Дельфин способен воспринимать частоты звуковых колебаний примерно в 10 раз более высокие (до 150 кГц), чем человек (до 15—18 кГц), и слышит звуки, мощность которых в 10—30 раз ниже, чем у звуков, доступных слуху человека.

Но чтобы ориентироваться в обстановке с помощью слуха, мало только слышать их, нужно еще тонко отличать один звук от другого. А эта способность дельфинов была исследована слабо, и мы постарались восполнить этот пробел.

Напомним, звук — колебания воздуха, воды или другой среды. Любой естественный звук — это набор колебаний разных частот. От того, какими частотами колебаний составлен звук, зависят его высота, тембр, т.е. то, чем один звук отличается от другого. Ухо животного или человека способно определять, из какого набора частот состоит звук: оно работает как набор частотных фильтров, каждый из которых откликается на свою частоту колебаний. Чтобы анализ был точным, настройка частотных фильтров должна быть острой. Чем острее настройка, тем меньшая разница частот доступна для

[5] Масс А.М. Разрешающая способность и особенности топографической организации сетчатки амазонского дельфина. Амазонский дельфин. М., 1996. С.199—214.

различения, тем выше частотная разрешающая способность (ЧРС) слуха.

Но звук — не просто набор разных частот. Каждая из них еще меняется во времени: становится то сильнее, то слабее. Слуховая система должна отслеживать эти быстрые изменения звука, и чем лучше она это делает, тем богаче сведения о свойствах звука. Поэтому помимо ЧРС очень важна временная разрешающая способность (ВРС). Обе эти характеристики и определяют способность животного отличать один звук от другого. Именно эти характеристики слуха мы измеряли у дельфинов.

Чтобы измерить какую-либо характеристику слуха, нужно решить две задачи: во-первых, узнать, слышит или не слышит животное пробный сигнал, а во-вторых, нужно подобрать пробные сигналы с такими свойствами, чтобы возможность услышать их зависела от измеряемого свойства слуха. Например, чтобы измерить чувствительность, нужно использовать звуки разной интенсивности: чем слабее звук, который удается услышать, тем чувствительность лучше.

Чтобы узнать, что слышит дельфин, мы использовали регистрацию электрической активности мозга. Каждая нервная клетка продуцирует электрические потенциалы. При воздействии звука много клеток возбуждается одновременно, и продуцируемые ими потенциалы складываются в довольно мощный электрический сигнал, называемый вызванным потенциалом (ВП). ВП можно зарегистрировать, прикоснувшись контактным электродом к поверхности головы; такая процедура совершенно безвредна для животного.

ВП — хороший показатель того, слышит ли дельфин звук. Если после подачи звука возник ВП, значит слуховая система реагирует на этот звук. Если величина ВП падает, звук воспринимается на пределе возможного. Если ВП нет — скорее всего звук не слышен.

Для измерения ЧРС используется прием, называемый маскировкой[6]. Сначала дается пробный сигнал — звук определенной частоты, который вызывает электрический ответ мозга — ВП (рис.4,*а*). Затем к звуку добавляется другой звук — помеха, заглушающая пробный сигнал, при этом амплитуда ВП падает (рис.4,*б*,*в*). Чем сильнее помеха, тем сильнее заглушение.

Маскировка используется для измерения ЧРС потому, что она зависит от частотно-избирательных свойств слуха. Сравним рисунки 4,*б* и 4,*в*. В одном случае частоты пробного звука и помехи совпадали (*б*), а в другом немного различались (*в*). Обе серии записей похожи, но числа показывают, что если частоты пробы и помехи различаются (*в*), то для маскировки нужна помеха намного сильнее при совпадающих частотах (*б*). Это и есть проявление частотной избирательности: слуховая система способна разделить частоты пробного сигнала и помехи, если они различаются. Чем острее частотная селективность, тем резче ослабевает маскировка при различии частот пробы и помехи. Нужно найти, как пороги маскировки зависят от разницы в частотах пробы и помехи.

Результаты представлены в виде кривой (рис.4,*г*). Чем острее получается кривая, тем лучше частотная избирательность, выше ЧРС. А повторяя измерения с разными частотами пробы, можно измерить ЧРС во всем частотном диапазоне слуха (рис.5). При исследовании остроты слуховых фильтров, настроенных на разные звуковые частоты[7], прежде всего была выявлена исключительно высокая ЧРС, особенно в области высоких звуковых частот (десятки кГц). Здесь уровень ЧРС доходит до 50 единиц, т.е. слух дельфина различает частоты, разнящиеся примерно на 1/50. Это в 4—5 раз лучше, чем у других животных и у

[6] Supin A.Ya., Popov V.V., Klishin V.O. // J. Comp. Physiol. 1993. № 173. P.649—656.

[7] Popov V.V., Supin A.Y., Klishin V.O. // J. comp. Physiol. 1995. № 178. P.571—578.

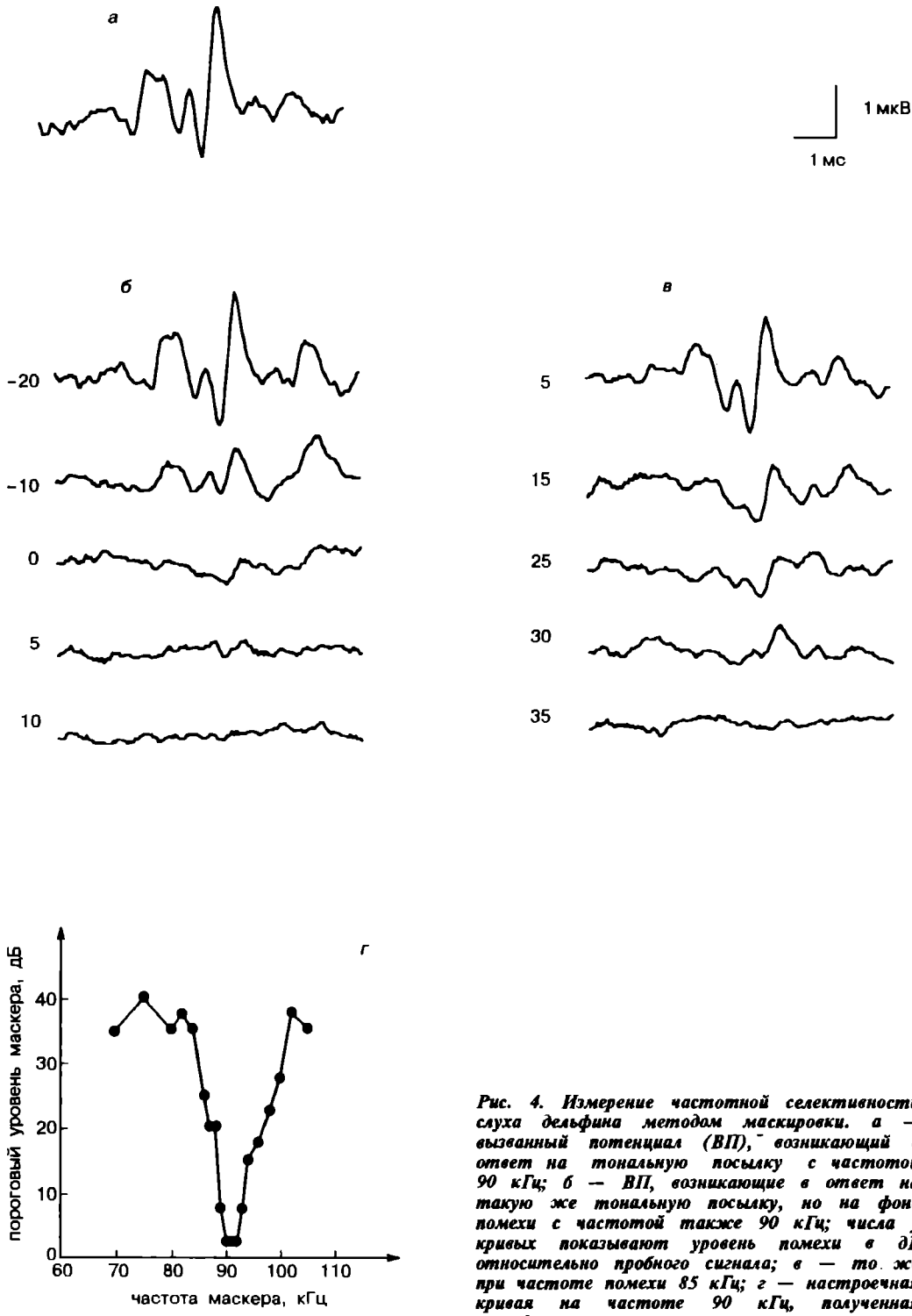


Рис. 4. Измерение частотной селективности слуха дельфина методом маскировки. а — вызванный потенциал (ВП), возникающий в ответ на тональную посылку с частотой 90 кГц; б — ВП, возникающие в ответ на такую же тональную посылку, но на фоне помехи с частотой также 90 кГц; числа у кривых показывают уровень помехи в дБ относительно пробного сигнала; в — то же при частоте помехи 85 кГц; г — настроечная кривая на частоте 90 кГц, полученная методом маскировки.

человека. Но такая высокая избирательность наблюдается только в области высоких звуковых частот, невоспринимаемых человеком. В том диапазоне, который доступен и человеку, и дельфину, избирательность слуха дельфина заметно меньше — примерно как у человека.

А как измерить временную разрешающую способность слуха? Для этого есть несколько способов. Можно использовать пары коротких звуковых импульсов: если интервал между импульсами в паре больше некоторой величины, то они слышатся раздельно, а если меньше, то сливаются в один щелчок. Тот минимальный интервал, при котором можно расслышать два отдельных импульса — мера ВРС. Можно использовать звук, интенсивность которого ритмически пульсирует: та предельная частота пульсаций, при которой они еще не сливаются в монотонный звук, — тоже мера ВРС. Еще один способ: в непрерывном звуке делается короткая пауза. Если длительность паузы очень мала, то она «проскакивает» незамеченной. Минимальная длительность паузы, при которой ее можно обнаружить, — тоже мера ВРС.

Мы использовали все эти способы. А чтобы узнать, слышит ли животное повторный звуковой импульс или пульсации громкости, или короткую паузу, тоже регистрируются ВП мозга[8]. Например, чем короче пауза, тем ВП меньше, пока не исчезнет совсем (рис.6). Так же определяется слышимость и других пробных сигналов.

Мы получили впечатляющие результаты: ВРС у дельфина оказалась не в два-три и даже не в десять раз выше, чем у человека, а в десятки (почти в сто) раз. Слух человека позволяет различать интервалы времени примерно от одной сотой секунды

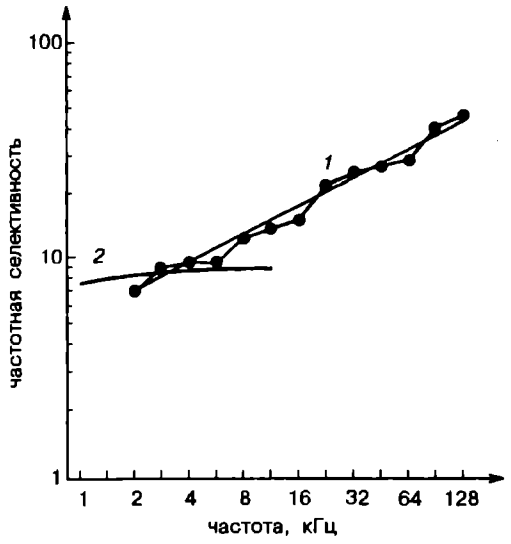


Рис. 5. Зависимость частотной селективности от частоты звука у дельфина и у человека. 1 — частотная селективность слуха дельфина (ломаная линия — экспериментальные данные, наклонная прямая — их аппроксимация); 2 — частотная селективность слуха человека (по литературным данным).

(10 мс). Дельфины же различают интервалы в десятитысячные доли секунды (0.1—0.3 мс). Разрыв в звуке, длящийся 0.1 мс, вызывает хоть и небольшой, но различимый ВП. То же наблюдается и при действии других пробных звуков. Два коротких звуковых импульса отличаются от одного, когда интервал между ними составляет всего 0.2—0.3 мс (у человека — несколько мс). Пульсации громкости звука вызывают ответы, когда их частота приближается к 2 кГц (у человека — 50—70 Гц).

Почему слуховая система дельфина имеет такие уникальные возможности? У человека и многих лабораторных животных ЧРС и ВРС слуха довольно близки, и создавалось впечатление, что это предел возможного для природы. Но слуховой системе дельфинов доступны и намного более острая частотная настройка, и лучшее различение интервалов времени. Почему же таких показателей не достигла слуховая система других животных?

Видимо, все дело в неизбежном

[8] Supin A.Ya., Popov V.V. // J. Acoust. Soc. Am. 1995. № 97. P.2586—2593; Supin A.Ya., Popov V.V. Frequency tunung and temporal resolution in dolphins // Sensory Systems of Aquatic Mammals / Kastelein R.A., Thomas J.A., Nachtigall P.E. Woerden (Netherlands), 1995. P.95—110; Supin A.Ya., Popov V.V. // Hearing Res. 1995. № 92. P.38—46.

противоречии между частотной и временной разрешающей способностью: чем лучше ЧРС, тем хуже ВРС, и наоборот. Это чисто математическая закономерность, справедливая для любой колебательной системы: если система остро настроена на определенную частоту (высокая частотная селективность), то ее колебания медленно раскачиваются и затухают (низкое временно́е разрешение). Это можно выразить простым соотношением:

$$Q = F/B,$$

где Q — острота частотной селективности, F — частота, на которую настроен фильтр, и B — полоса пропускания фильтра, т.е. тот набор частот, который он пропускает. Темп, с которым может меняться амплитуда сигнала, зависит от полосы B: чем она шире, тем более быстрые изменения сигнала пропускаются фильтром, но тем «тупее» фильтр (меньше Q). Поэтому слуховая система должна найти некоторый компромисс между ЧРС и ВРС, ограничив обе эти характеристики на некотором уровне. Улучшение одной из них возможно только за счет ухудшения другой.

Но противоречие между ЧРС и ВРС становится менее драматическим по мере увеличения частоты F: при высокой частоте можно сочетать широкую полосу B с острой избирательностью Q. Именно это и наблюдается для слуха дельфина, который освоил простор ультразвуковых частот.

Значит, ЧРС и ВРС слуха реально обусловлены не пределом возможного для слуховой системы, а разумным компромиссом между этими двумя характеристиками. Так исследование, казалось бы, экзотического животного позволяет понять фундаментальные принципы построения слуховой системы всех животных и человека.

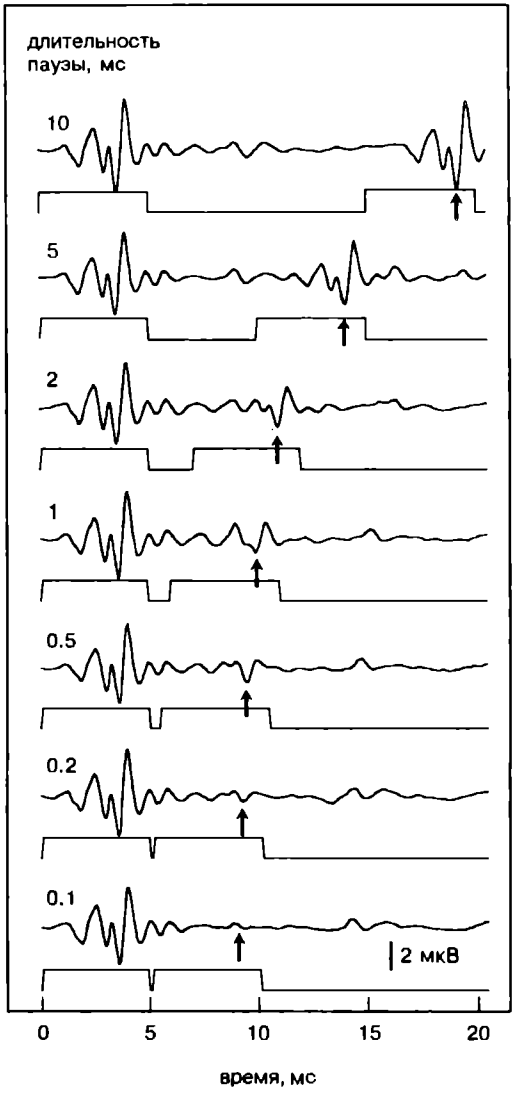
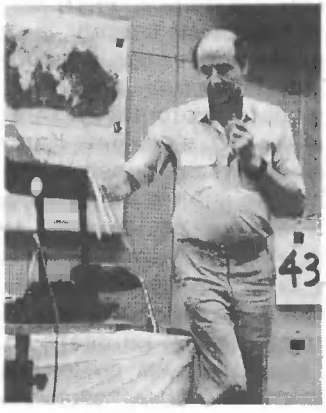


Рис. 6. Слуховые ВП, возникающие у дельфина в ответ на короткую паузу в шуме. В каждой паре осциллограмм верхняя — регистрация биопотенциалов, нижняя — отметка включения-выключения звука (сдвиг вверх — включение, вниз — выключение). Длительность паузы между двумя звуковыми посылками указана цифрами рядом с осциллограммами. Стрелки указывают ответы на паузу (они возникают с задержкой около 4 мс).

Жестокая любовь кальмаров

К. Н. Несис



Кир Назимович Несис, доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН; вице-президент Малакологического общества России. Главный редактор «Ruthenica»: Russian Malacological Journal». Область научных интересов — систематика, распределение, экология и эволюция головоногих моллюсков, общие проблемы морской зоогеографии, экологии и эволюционной теории.

ЛЮБОВЬ у кальмаров? Тоже мне нежности... Это вам не каракатицы, у которых самец загодя выбирает лучший участок дна, охраняет его от других самцов, приманивает самку и, одевшись в самые броские цвета, красиво за ней ухаживает. И не осьминоги, у которых самец специально демонстрирует самке разные детали своего тела, чтобы она усвоила, что он вполне готов к важной службе и сразу кушать его нельзя, разве что после спаривания, а оно может длиться (например, у гигантского северотихоокеанского осьминога с Дальнего Востока) более часа[1]... Спаривание же кальмаров, разумеется тех, которые были изучены, по продолжительности приближается к скоротечному воздушному бою: слетелись — сцепились — разлетелись... И никаких церемоний! Поэтому когда мой коллега, известный полярный исследователь Игорь Мельников летом 1992 г. вернулся с дрейфующей льдины из Антарктики (с Американо-Российской дрейфующей станции «Уэдделл-I») и сказал, что они там на льдине, в лунке, поймали сачком двух кальмаров и скоро их привезут, — я и подумать не мог, какая жестокая кальмарья любовь мне откроется. Но по порядку!

Спаривание у всех головоногих состоит в том, что самец передает самке один или несколько сперматофоров[2]. Сперматофор — это похожий на узкую трубочку пакет со спермой. Сперматофоры могут быть короткими или длинными (от нескольких миллиметров до метра с лишним, обычно же сантиметровых размеров). И это не

© К.Н.Несис

[1] Несис К.Н. Океанические головоногие моллюски: Распространение, жизненные формы, эволюция. М., 1985.

[2] Nesis K.N. Cephalopods of the World. T.F.H. N.Y., 1987.

просто трубочка со спермой, а хитрое устройство, имеющее сложную оболочку и весьма замысловатый аппарат для выбрасывания спермы, снабженный чувствительным волоском, мощной пружиной и тюбиком с клеем, прикрепляющим живое к живому, да еще в водной среде (прямо мечта хирурга!). Сперматофоры находятся у самца в специальном органе (нидхэмовом мешке), заканчивающемся пенисом, который тоже может быть простой трубкой или сложно устроенным аппаратом. А передает он их самке у одних видов пенисом, у других — специально видоизмененной рукой; она называется «гектокотиль» и снабжена особыми зажимами или щипчиками, чтобы прочно схватить сперматофор, выходящий из воронки (открытой конической трубки на нижней стороне головы — сопла реактивного движителя головоногого моллюска), и передать его самке, поместив именно в том месте, где нужно.

Место это — совершенно определенное и у каждого вида кальмаров свое: у одних для помещения сперматофоров служит ямка подо ртом с типичным для кальмаров попугайным клювом, у других они располагаются на ротовой мембране, кольцом вокруг рта, у третьих — вблизи жабр, на внутренней стенке мантии (мускулистой оболочке тела, за которую кальмаров и ценят, потому что именно ее едят), у четвертых — на затылке, в особой ямке. Впрочем, есть, кажется, и такие виды кальмаров, у которых самцу все равно, куда приклеить сперматофоры — хоть на голову, хоть на хвост, лишь бы разгрузиться.

Помещены ли сперматофоры в специальную ямку, приклеены ли к внутренней стороне мантии или распределены вокруг рта — в любом случае, выйдя из тела самца, они вступают в контакт с морской водой, и тут начинается процесс, именуемый сперматофорной реакцией, а проще — взрывом сперматофора. Чувствительный волосок надрывает тонкую перепонку, и морская вода осмотическим путем поступает внутрь оболочки сперматофора. Но оболочка прочная, двуслойная, вода давит на пружину, сжимает ее, и в конце концов наружная оболочка не выдерживает и разрывается у переднего конца пружины. Пружина вылетает наружу, вытягивает за собой внутреннюю оболочку, содержащую сперму, а тюбик с клеем прикрепляет ее к коже кальмарихи. Там сперма спокойно дожидается нереста, который у кальмаров бывает лишь раз в жизни. Кальмариха может спариваться перед самым нерестом, будучи вполне половозрелой, а может и задолго до нереста, месяца за два, за три, будучи еще совсем незрелой. В этом случае самцов на нерестилище вовсе не бывает, их к тому времени, может, уже и на свете-то нет.

Вот самка выметывает яйца. Если сперматофоры приклеены возле жабр — яйца проходят мимо них сразу после выхода из яйцеводов; если сперматофоры размещены на затылке самки — яйца двумя ниточками выметываются через два отверстия по бокам шеи, справа и слева от затылка, если же они выметываются через воронку, значит, проходят мимо кольца сперматофоров вокруг рта. Так или иначе, яйца обязательно оказываются у того места, где хранится сперма, и оплодотворяются.

Стремительное спаривание у кальмаров действительно подобно воздушному бою. И в том, и в другом случае успех загодя обеспечивается технически: в авиации — локатором, компьютерным расчетом выхода в атаку и сложнейшим устройством ракеты или авиапушки, у кальмаров — изощренным строением сперматофора и прехитростными приспособлениями для прикрепления спермы в нужной позиции и сохранения ее в жизнеспособном состоянии на протяжении 2—3 месяцев — без всякого жидкого азота!

Вроде бы все понятно. Только почему-то у меня получалось, что далеко не все. Я только пришел работать в Институт океанологии Академии наук и начал изучать океанических кальмаров и осьминогов, как в руки мне попались две самки кальма-

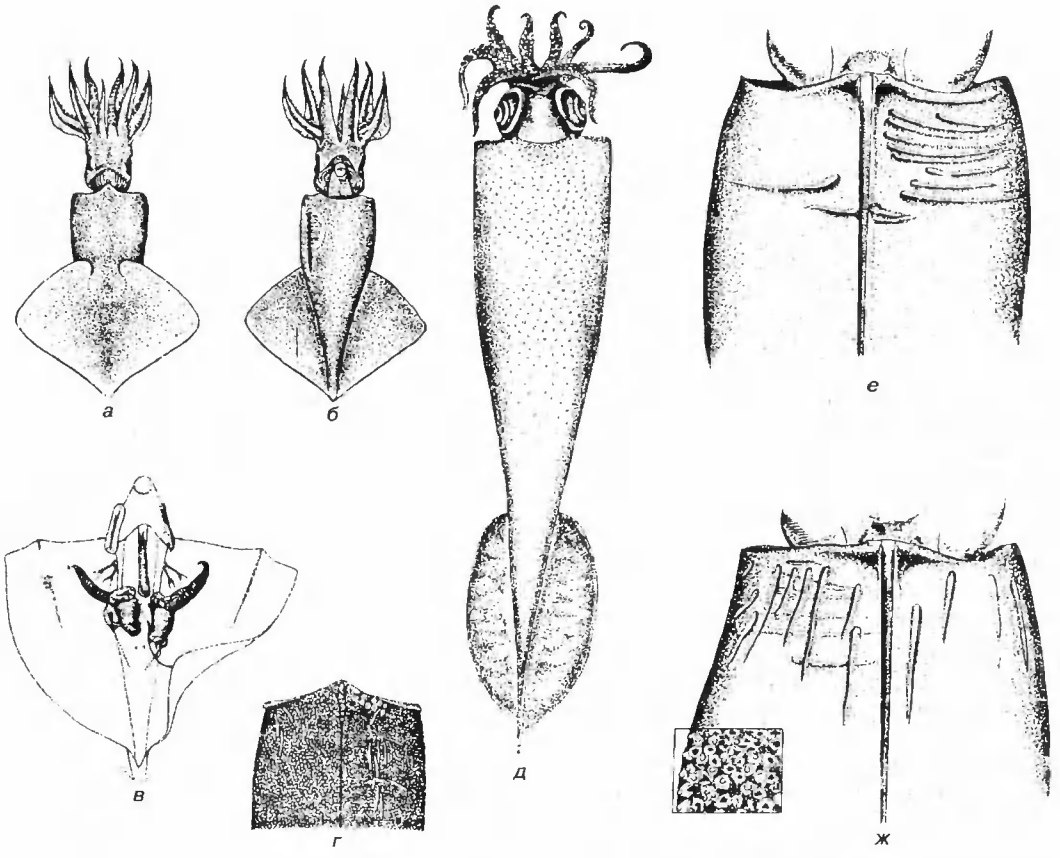
ра — их извлек из желудка рыбы алепизавра, выловленной в 1963 г. в Индийском океане, южнее Суматры, мой шеф Н.В.Парин. Оба кальмара были совершенно студенистые, будто не кальмары, а медузы, и без щупалец. Но не оттого студенистые, что переваренные, и не потому без щупалец, что их рыба откусила: кальмары были свежехонькие, вся окраска сохранилась, и у обоих бросалось в глаза по одной недлинной полоске на брюхе. Странные полоски — как острым ножом прорезаны, начинаются чуть отступя от переднего края и идут в сторону хвоста параллельно оси тела. Из каждого разреза выглядывают головки сперматофоров, и что интересно: сами сперматофоры аккуратно уложены под кожей (совершенно целой!) в тканях мантии, и лишь их головки (то место, где прикрепляется чувствительный волосок) и шейки (где лежит пружина) торчат в разрез. Причем все сперматофоры — пустые, без спермы, одни оболочки. Очевидно, сперма была использована по назначению: обе самки отнерестились, и зрелых яиц у них не было.

Такие кальмары давно описаны в литературе[3]. Считалось, что это — особый род и вид *Chaunoteuthis mollis* (*mollis* по-латыни мягкий), в котором, как ни странно, известны были только самки, все зрелые, все студенистые, все без щупалец и с разрезами на брюхе: у кого один разрез, справа или слева от середины брюха (а—в на рис.), у кого — два (по обе стороны). И в разрезах — сперматофоры. Но относится сей род и вид к семейству, в котором все прочие роды и виды мясистые, со щупальцами и на щупальцах сидят крупные острые крючья. Семейство называется: крючьеносные кальмары, *Onychoteuthidae*. Подумайте: мясистые крючьеносные кальмары, но без мяса и крючьев. И без самцов.

Как возникают разрезы на брюхе самки и как оплодотворяются яйца? Разные авторы высказывали предположения, что, дескать, разрезы самец делает клювом, а самка, выметывая яйца, прогоняет их у себя под брюхом, и по пути они оплодотворяются. Странно: клюв кальмара, как и клюв попугая, — это не коготь; он хорош для раскусывания, а не для разрезания пищи, мягкую мантию самки он может порвать, но не разрезать. Яйца выходят наружу через воронку в сторону головы, и самке трудно их развернуть к брюху, а если и удастся, много ли яиц окажется оплодотворенными при такой странной операции?

В то время я не смог в этом разобраться. Постепенно, однако, накапливались зарубки в памяти: в разных семействах кальмаров есть отдельные виды, известные только по самкам, всегда студенистым и без щупалец, да к тому же выловленным на поверхности океана (а другие виды тех же семейств — глубоководные, довольно-таки мясистые и со щупальцами). Кое-каких я и сам изловил и рассмотрел свеженькими. Крепла мысль, что эти «мягкие» самки относятся не к особым, а к вполне обычным видам, только при половом созревании они претерпевают студенистое перерождение, мантийные мышцы у них редуцируются, ткани обводняются, щупальца автотомируются — отрываются сами собой (как хвост у ящерицы), от их стеблей не остается и следа, разве только одинаковые справа и слева короткие основания, а такого не может быть, если щупальца кем-то оторваны или откушены. Как я предположил — и это потом подтвердилось — кальмары *Chaunoteuthis mollis* оказались самками обычных для тропиков и субтропиков Мирового океана крючьеносных кальмаров *Onychoteuthis banksii* (тех самых, молодь которых некогда атаковала в Тихом океане бальсовый плот Тура Хейердала «Кон-Тики»: спасаясь от хищных рыб, кальмарчики разгонялись до такой скорости, что вылетали из воды и падали на плот). А завершивших размножение самцов в наших

[3] Nesis K.N. // Ruthenica: Russ. Malacol. J. 1996. V.6. № 1. P.23—64.



Спаривание у кальмаров с переносом сперматофоров в разрезы на мантии. *Chaunoteuthis mollis* ***(а—в): самка со спинной (а), брюшной (б) сторон и вскрытая (в); на б и в виден разрез (полоска) со сперматофорами.*** *Teuthowenia pellucida* ***(г): передняя часть мантии спаривавшейся самки со спинной стороны; видны удлиненные сперматофоры и (в верхней части мантии) круглые отпечатки присосок самца на коже самки.*** *Galiteuthis glacialis* ***(д—ж): самки, которые спаривались и выметали яйца; их общий вид с брюшной стороны (д) и передние части их мантий со спинной стороны (е и ж); выделен кусочек кожи с рисунком, находящийся над сперматофором. (По: Nesis K. N., 1996.)***

сборах нет, видимо, потому, что они, погибая после нереста, не всплывают к поверхности, а тонут. Значит, студенистого перерождения не претерпевают и остаются до смерти тяжелее воды.

Вот тут-то и подоспели два кальмара, пойманные сачком в лунке на дрейфующей льдине в море Уэдделла[4]. Обе — самки, и довольно крупные, больше полуметра. Но легкие — с очень тонкой мантией, студенистые и без щупалец. Несомненно, выметали всю икру — только острый глаз моего друга и коллеги-кальмарщика Чингиза Нигматуллина обнаружил в яйцеводе каждой из самок по одному-единственному зрелому яйцу, случайно там оставшемуся. У обеих кальмарих на спине в передней части тела под кожей — сперматофоры. Длинные, 30—35 мм. У одной — поперек тела, строго параллельно друг другу, а у другой — и вдоль, и поперек, но тоже параллельно друг

[4] Nesis K.N. Bizarre mating and post-spawning surfacing in a bathypelagic Antarctic squid. SCAR 6th Biology Symp., Venice, 30 May — 3 June 1994. Abstracts. 1994. P.196.

другу (е, ж на рис.). Значит, эта самка два раза спаривалась. И опять же совершенно пустые сперматофоры, одни их прозрачные на просвет оболочки лежат в толще мантийных мышц (точнее, того, что от них осталось после студенистого перерождения), причем лежат ближе к внутренней стороне мантии, чем к наружной. Кожа над ними абсолютно целехонькая, типичный изящный рисунок сохранился прекрасно. А если посмотреть изнутри — рядом с головкой каждого сперматофора видно кругленькое «окошечко», открывающееся на внутреннюю сторону мантии. Значит, сперматофор «взорвался», сперма вытекла внутрь мантии и уже использована. Стало быть, все-таки яйца оплодотворяются именно внутри тела. Да и ясное дело, не на спине же у самки это происходит!

Вид кальмара определить не составило труда: налицо все характерные признаки *Galiteuthis glacialis* (в переводе — ледяной соленый кальмар; по-русски — из-за покрытой мельчайшими шипиками кожи — он называется антарктическим шероховатым кальмаром). Это один из самых обычных и массовых антарктических кальмаров. Не очень мясистый, скорее кожистый, но с мощными щупальцами, вооруженными крепкими и очень острыми крючьями. Притом вид глубоководный, взрослые кальмары живут на глубинах 500—2500 м. Самцы ледяного, или шероховатого, кальмара хорошо известны. Только их не на поверхности моря подбирали, а так же, как молодь и неполовозрелых самок, ловили крупногабаритными глубоководными тралами.

Этих кальмаров с удовольствием едят кашалоты, громадные дельфины бутылконосы, морские слоны, тюлени Уэдделла — а это все мастера глубокого заныривания. Но также альбатросы — птицы до того легкие, что нырнуть даже на маленькую глубину неспособны и кормятся только с поверхности. У альбатроса глотка здоровенная, и ледяного кальмара он может заглатывать целиком. Едят альбатросы и гигантских кальмаров, а те живут еще глубже, чем ледяной. Многие исследователи ломают голову: как неспособные нырять птицы ухитряются поедать гигантских глубоководных кальмаров?

Но вот теперь все стало на свои места. Почти все. Потому что ответов оказалось немало, но вопросов появилось еще больше. Да, действительно, самки многих глубоководных и полуглубоководных кальмаров из разных семейств, и маленьких, и гигантских, при половом созревании претерпевают студенистое перерождение и утрачивают щупальца, а после нереста всплывают к поверхности и погибают. Их-то и высматривают альбатросы, часами, не взмахнув крылом, парящие над волнами. Самцы же, похоже, не перерождаются, остаются мускулистыми и щупалец не утрачивают, а после смерти тонут и достаются на обед глубоководным хищникам и мусорщикам. Их остатки находили немецкие исследователи у рыб-долгохвостов (макрурусов), добытых на дне Атлантического океана на глубине нескольких километров.

Самка, утерявшая щупальца и почти всю мускулатуру, ловить добычу не в состоянии. У всех студенистых кальмаров, которых я исследовал, желудки были пусты или содержали микроскопические остатки пищи. Значит, весь период созревания яиц и нереста самка живет на собственных энергетических запасах — питается, так сказать, своими мышцами.

Мне кажется, что самец ледяного кальмара при спаривании раздирает мантию самки своими острыми крючьями, как когтями, а какие царапины оставляют кошачьи когти, каждый испытал на себе! Число царапин на мантии изученных нами самок приблизительно равно числу крючьев на одном щупальце самца. У спарившейся самки ледяного кальмара, описанной американским зоологом Э.Максуини, их было вдвое больше — очевидно, самец пустил в ход оба щупальца. Поэтому-то царапины и параллельны — одним взмахом сделаны! Затем самец аккуратно укладывает

в каждый разрез по сперматофору. Чем? Может быть, пенисом, но скорее — руками. У половозрелых самцов ледяного кальмара концы рук спинной, а часто и спинно-боковой пары удлинены, оттянуты, присоски на них очень маленькие. А манипулировать руками головоногие умеют прекрасно. Самки осьминогов сплетают стебельки своих яиц в длинные грозди и приклеивают их к потолку норы. Самки одного вида каракатиц, у которых яйца с двумя стебельками, надевают их на веточки мягкого коралла и связывают стебельки узелком, получается вроде кольца на пальце. А самки рифового кальмара тщательно приклеивают яйцевые кладки под кораллами в столь узких щелях, что моя рука там не проходила. Такое умение особенно важно для *Galiteuthis glacialis*: ведь у этих кальмаров мантия прирастает к голове на затылке и к воронке на ее боковых сторонах, так что самец при спаривании может проникнуть в мантию самки только через две узкие щели по бокам головы. Ему приходится засовывать туда сначала щупальца — расцарапать мантийные ткани, а затем руки (или пенис?), чтобы наощупь уложить сперматофоры в царапины и закрепить их там. Нелегкое искусство!

Но, возможно, все обстоит совсем иначе: самец размещает сперматофоры не изнутри мантии самки, а снаружи, и потом они каким-то образом «проплавляют» мантию насквозь и опорожняют сперму внутрь. Как же, однако, сперматофор может проплавить мантию, пусть студенистую и почти безмускульную? Совсем непонятно. И главное, почему на коже над пустыми сперматофорами нет никаких следов ранения? Шрам-то должен остаться!

У других кальмаров семейства *Cranchiidae*, к которому принадлежит ледяной кальмар, сперматофоры тоже прикрепляются к спинной стороне мантии в разрезах, сделанных крючьями, а у видов без крючьев — присосками щупалец или же рук (у кальмаров четыре пары рук и пара длинных щупалец) с длинными острыми зубцами, как у *Teuthowenia pellucida*. Но снаружи это делается или изнутри? У одной самки глубоководного кальмара *Bathothauma lyromma* американский зоолог Р.Янг нашел внутри мантии две длинных руки половозрелого самца того же вида. Самка батотаумы была не вполне зрелая и не дегенерировавшая; видимо, сопротивлялась и оторвала бедному самцу руки. Если бы самец прикреплял сперматофоры снаружи, как его руки могли бы оказаться внутри мантии самки? Или он просто хотел потрогать и убедиться, что самка готова к спариванию? Да нет, похоже, что все-таки он переносил сперматофоры внутрь мантии самки!

У *Chaunoteuthis mollis* самец делает разрезы на брюхе самки, очевидно, не клювом, а крючьями — кальмары-то крючьеносные! И, наверное, снаружи. Да он и не мог бы это сделать изнутри, руки у него с толстыми концами, не приспособленные для точных манипуляций. Но как сперматофоры укладываются в разрезе под кожей? И как сперма попадает внутрь мантии? Непонятно...

Насколько я знаю (сам видел или читал), у тех видов кальмаров, самцы которых переносят сперматофоры в разрезы на теле, самки претерпевают студенистое перерождение и, умирая после нереста, всплывают. Но отнюдь не все кальмары, у которых самки дегенерируют и всплывают, спариваются столь экзотическим образом. Среди них есть и виды, сперматофоры которых размещаются на внутренней стенке мантии или ротовой мембране, как это происходит у кальмаров без студенистого перерождения.

Так для чего нужен столь варварский способ спаривания? Кальмар ты или не кальмар, это же, наверное, очень больно, когда чужие щупальца залезают внутрь твоего тела, когтями рвут тебе кожу, затем внутрь залезают другие конечности и что-то укладывают в болящие раны. Неужели самка кальмара подобна индейскому мальчику, который во время обряда инициации переносит мучения с улыбкой на

лице? Есть племена, в которых мучают и девочек (обряд эксцизии у некоторых народов Африки, выбивание передних зубов перед замужеством у меланезийцев Новых Гебрид), но девочкам «держать улыбку» при этом не строго обязательно.

Разумеется, если бы самка не дегенерировала и не потеряла щупальца, самцу не удалось бы совершить свое важное, но жестокое дело. У большинства кальмаров самки крупнее самцов, и сожрать насильника им проще простого. У многих кальмаров (и у пелагических осьминогов-аргонавтов с красивой раковиной) самка после спаривания пожирает самца или, по крайней мере, откусывает часть его рук. Конечно, можно сказать, что дегенерация для вида выгодна: энергетические ресурсы мышц дегенерирующей самки превращаются в энергетические запасы для яиц и расходуются на их созревание и нерест. Большая, казалось бы, экономия. Но ведь у самцов такого не происходит, значит, можно без этого обойтись. Да и сколько угодно есть кальмаров, у которых никакого студенистого перерождения не бывает, самка до самого нереста сохраняет прекрасный аппетит и остается мускулистой (и вполне съедобной!). Неужели самка дегенерирует только для того, чтобы не оказать сопротивления самцу, раздирающему ей внутренности? Как хотите, а это сильно напоминает одно произведение Станислава Лема — рецензию на ненаписанную книгу о том, как люди во всем мире вдруг перестали получать удовольствие от плотской любви. Любовь превратилась в нудное и мучительное занятие, от которого хотелось улизнуть, как от тяжкого труда. Детей стали рожать только способом искусственного оплодотворения, а желание получать удовольствие перенесли на еду. Появились «едовые извращения» и все такое прочее...

Нет, не сумел я понять кальмарью душу. Гораздо понятнее простые чувства альбатроса, который парит над просторами океана и высматривает: не всплыла ли где-нибудь отметавшая яйца самка кальмара? Лучше — гигантского. Ничего, что икры в ней нет и мясо водянистое, зато сколько его! И глубоководных рачков-бокоплавов, что плавают стаями в толще воды поближе ко дну и вынюхивают: не опустился ли где-нибудь на дно окончивший свои жизненные дела издыхающий самец кальмара (опять же лучше гигантского), я тоже понять могу. Но мудрость жестокой любви кальмаров я так и не уразумел (пока?).

* * *

Уважаемые читатели! Не думайте, пожалуйста, что Джордж Сорос, пусть он будет здоров, тратит деньги, чтобы я мог изучать столь изящный предмет, как любовь у антарктических кальмаров! Ни в коем случае! Тема моих, поддержанных Фондом Сороса, изысканий — глубоководные кальмары и осьминоги северных и дальневосточных морей России. Их состав, распространение, биология и место в экосистемах. А место это, как выясняется, очень существенное. И весьма большую роль в экосистемах наших морей играют именно те кальмары, которые при созревании испытывают студенистое перерождение и у которых самки после нереста всплывают, а самцы (как я предполагаю) тонут[5]. Это и гонатидные кальмары семейства *Gonatidae*, и крючьеносные *Onychoteuthis*, и «соленые» *Galiteuthis* (только другой, чем в Антарктике, вид, гладкий) — все они водятся у нас на Дальнем Востоке, и в весьма больших количествах. Они поедают массу планктона и мелкой рыбы, а их в свою очередь поедают бесчисленные рыбы, киты, дельфины, тюлени и, конечно же, морские птицы. Исследовать их биологию не просто интересно, от этого и польза может произойти. Ну, а раз биологию — значит, и любовь.

---

[5] Nesis K.N. // Ruthenica: Russ. Malacol. J. 1993. V.3. № 2. P.153—158.

Nota bene

Ботаника. Экология

Деревья разных видов «подкармливают» друг друга

При знакомстве с результатами работы С.Симард из Министерства лесного хозяйства Британской Колумбии (Канада) и ее коллег[1], которым с помощью изящно поставленных экспериментов удалось показать, что деревья разных видов, связанные мицелием одного гриба, могут обмениваться веществом, образовавшимся в процессе фотосинтеза, невольно возникает мысль, что экологам придется существенным образом пересмотреть представления, ставшие почти общепризнанными.

Напомним, что в первой половине XX в. очень популярны были идеи американского эколога Ф.Клементса, согласно которым растительное сообщество есть некий «суперорганизм» с очень высокой степенью интеграции. Такой точке зрения противостояла «индивидуалистическая» концепция, развивавшаяся в СССР Л.Г.Раменским, а в США А.Глизоном[2]. Если «органицисты» (к которым среди отечественных ученых можно отнести и В.Н.Сукачева) делали упор на общие закономерности развития всех сообществ, «индивидуалисты» уделяли основное внимание изучению реакций отдельных видов растений на те или иные конкретные условия. В последние десятилетия позиция «индивидуалистов» заметно упрочилась — была выяснена[3], в частности, та важная роль, которая принадлежит в формировании структуры растительного сообщества межвидовой конкуренции, естественным образом подразумевающей, что каждый вид стоит сам за себя.

Из школьного учебника биологии мы знаем, что микориза (буквально «грибокорень») — симбиоз гриба и высшего растения, позволяющий грибу использовать некоторые вещества, синтезируемые растениями, а растению более эффективно потреблять питательные элементы из почвы. Уже в 80-е годы было обнаружено[4], что гифы грибов, образующих микоризу, могут соединять разные виды деревьев, причем продукты фотосинтеза одного растения способны передаваться по грибному мицелию другому. Оставалось, однако, неясным, может ли между растениями происходить обмен органическим веществом, и если да, то насколько он взаимовыгоден. И вот что показали эксперименты, которые Симард и ее коллеги проводили с саженцами двух разных (но произрастающих в природе вместе) видов деревьев — березы бумажной (*Betula papyrifera*) и псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii*).

Опыты проводили в течение двух сезонов с саженцами двух- и трехлетнего возраста, которые высаживались смешанными группами с расстоянием между растениями около 0.5 м. Чтобы выяснить, возможен ли обмен веществом между растениями, каждое из них помещали в пластиковые мешки, подавая туда порцию диоксида углерода, меченного для одного вида изотопом ^{13}C, а для другого — ^{14}C. Через 1.5 недели после «подкормки» растения изымали и оценивали содержание изотопов в тканях каждого растения отдельно.

Как установлено, между березой и псевдотсугой происходил взаимный обмен продуктами фотосинтеза, причем в первый год он был примерно одинаков в обоих направлениях, а во второй — псевдотсуга оказывалась в явном выигрыше: чистый перенос углерода на 2.5—10% превышал обратный его поток к березе. В некоторых вариантах опыта псевдотсугу до подкормки CO_2 в течение четырех—шести недель выдерживали в затенении, и именно в этом случае особенно возрастало потребле-

[1] Simard S.W. et al. // Nature. 1997. V.388. P.579—582.

[2] Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии. М., 1985; Гиляров А.М. // Журн. общ. биологии. 1988. Т.49. № 2. С.202—217.

[3] Tilman D. Princeton (NJ): Princeton Univ. Press. 1988.

[4] Francis R., Read D.J. // Nature. 1984. V.307. P.53—56; Finlay R., Read D.J. // New Phytol. 1986. V.71. P.143—156.

ние ею углерода, фиксированного березой.

Результаты данного исследования порождают ряд вопросов.

Прежде всего: можно ли рассматривать обмен продуктами фотосинтеза как свидетельство взаимопомощи между деревьями разных видов? Если да, то как объяснить его возникновение в процессе эволюции, не вступая в противоречие с современным дарвинизмом и концепцией «эгоистичного гена»? Один из вариантов объяснения предполагает, что такой обмен есть всего-навсего побочный продукт коэволюции высших растений и грибов, а некоторая часть продукции, отдаваемая одним растением другому (который, возможно, является конкурентом), — своего рода незначительная плата за громадные преимущества, предоставляемые микоризой. Не следует сбрасывать со счета и то, что донор может превратиться в реципиента, если условия его существования ухудшатся.

Второй вопрос: не грядет ли в самом скором времени радикальный пересмотр представлений о механизмах, ответственных за поддержание структуры растительных (прежде всего — лесных!) сообществ. В своей недавно опубликованной книге «Наша биосфера» испанский эколог Р.Маргалеф[5], уделив особое внимание жизненной форме дерева как необычайно совершенному «изобретению» эволюции, подчеркнул, что если вертикальный транспорт в лесу обеспечивается самими деревьями, то сеть горизонтальных связей устанавливается с помощью грибов — организмов, обладающих, по его выражению, удивительными «организующими и контролирующими способностями». Остается только восхититься прозорливостью выдающегося эколога — ведь книжка появилась до того, как вышел номер «Nature» с обсуждаемой здесь работой.

© А.М.Гиляров,
доктор биологических наук
Москва

[5] Margalef R. Our biosphere. Oldendorf, 1997.

Астрономия

«Дымящая» звезда

Звезду R в созвездии Северная Корона обычно можно наблюдать не только в простой бинокль, но даже невооруженным глазом (при хороших условиях). Однако раз в несколько лет (но нерегулярно) она внезапно окутывается непроницаемым облаком из сажи, которое вскоре рассеивается. Долгое время это явление оставалось неизученным.

В октябре 1995 г. астрономы-любители сообщили, что R Северной Короны вновь начала окутываться дымным углеродным облаком. К 27 января 1996 г. ее можно было различить лишь в крупный телескоп, причем помутнение продолжалось. На этот раз появление облака ненамного предшествовало запуску искусственного спутника Европейского космического агентства «ISO» («Infrared Space Observer»). На борту этого космического наблюдателя в инфракрасной полосе спектра установлен совершенный фотометр.

10 февраля 1996 г., при максимальной плотности облака, было зафиксировано инфракрасное излучение звезды с выраженным поглощением в диапазоне 2—5 мкм, указывающим на скопление молекулярного углерода.

Астрофизик Х.Уокер (H.Walker; Лаборатория им.Резерфорда и Эпплтона, Кембридж, Англия), изучив космические данные, пришла к выводу, что образование углеродно-сажевого облака происходит здесь постепенно, отличаясь этим от процессов, наблюдаемых на квазарах и других звездных объектах.

Звезда R Северной Короны состоит почти целиком из гелия и углерода, причем углерода в семь раз больше, чем в обычных звездах; а от водорода не обнаружено даже следов.

Ни причины, ни механизмы столь обильного выброса сажи этой звездой неизвестны. Неясно также, образуется ли облако прямо на поверхности звезды или конденсируется вдали от нее в условиях пониженной температуры.

New Scientist. 1996. V.150. № 2036. P.17 (Великобритания).

Планетология

Странности пятен Нептуна

В 1994 г. американские астрономы Х.Б.Хаммел (H.B.Hammell; Массачусетский технологический институт, Кембридж) и У.Локвуд (W.Lockwood; Лоуэлловская обсерватория, Флагстафф, штат Аризона) приступили к регулярным наблюдениям Нептуна с помощью Космического телескопа им.Хаббла.

Через год они, к своему удивлению, установили: одно из интереснейших образований на планете — Большое темное пятно, которое наблюдалось приборами космического аппарата «Вояджер» в 1993 г., зага-

дочно исчезло. Еще более неожиданным стал факт появления в Северном полушарии планеты нового темного пятна, не уступающего по размерам первому. Изображение этого нового пятна отчетливо видно и на снимках, полученных в 1995 г.; Хаммел и Локвуд отмечали его и во время краткого периода наблюдений в начале 1996 г.

В августе 1996 г. группа астрономов во главе с Л.Сромовским (L.Sromovsky; Университет штата Висконсин, Мадисон) сделала с помощью телескопа им.Хаббла снимки поверхности Нептуна в Северном полушарии, на которых также заметно темное образование; возможно, это то же пятно.

Поразительно, что в условиях сильнейших ветров, характерных для атмосферы Нептуна, пятна сохраняются столь долгое время. Эта проблема стала предметом всестороннего обсуждения среди участников конференции Отделения наук о планетах Американского астрономического общества, состоявшейся в ноябре 1996 г. в Тусоне (штат Аризона).

Science News. 1996. V.150. № 20. P.314 (США).

Физика

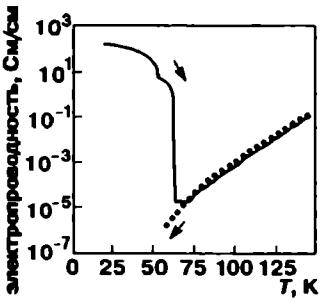
Переход диэлектрик—металл при рентгеновском излучении

Повышенный интерес исследователей к оксидам марганца с общей формулой $A_{1-x}B_xMnO_3$ (A, B — трех- и двухвалентные катионы) вызван их необычными магнитными и электронными свойствами. В некоторых материалах этого семейства под действием внешнего магнитного поля происходит фазовый переход диэлектрик—металл, при котором электрические и магнитные свойства вещества кардинально меняются. Гигантский рост электропроводности в этих условиях был назван эффектом колоссального магнитосопротивления.

Группа ученых во главе с В.Кирюхиным (V.Kiryukhin; Принстонский университет, Нью Джерси, США) исследовала в широком диапазоне температур особенности кристаллической структуры соединения $Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$, имеющего температуру такого перехода около 200 K. Два стандартных метода анализа — нейтронографический и рентгеноструктурный — давали при температурах образца выше 40 K идентичные результаты. Однако при низких температурах (около 4 K) исследователи столкнулись с новым явлением. Характер рентгеновской дифракции резко изменился: интенсивность отраженного в определенном направлении излучения (брэгговского пика) заметно падала непосредственно в процессе облучения.

Электропроводность образца, измеряемая параллельно, возрастала при каждом включении рентгеновского источника, причем в паузах между облучениями заметного изменения электропроводности не наблюдалось в течение значительного времени (несколько часов). Интенсивность брэгговского пика до и сразу после двадцатиминутной паузы была практически одинаковой. Установлено также, что рентгеновские кванты вызывают переход из антиферромагнитного состояния, присущего данному соединению, в ферромагнитное. При нагревании до 60 K первоначальные свойства быстро восстанавливаются.

Анализ влияния температуры и внешнего магнитного поля позволил заключить, что



Электропроводность образца $Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$, измеренная при охлаждении без облучения (отмечена точками), при нагревании и умеренном рентгеновском облучении (линия).

возрастание проводимости связано с появлением при поглощении излучения рентгеновских фото- и вторичных электронов. То обстоятельство, что эти электроны не захватываются сразу после прекращения облучения, а продолжают участвовать в проводимости, они объясняют отсутствием центров захвата. Образование фотоэлектронов при низкой температуре происходит без возмущения и нарушения кристаллической решетки, препятствуя появлению таких центров.

Найдены материалы и с более высокой температурой подобного перехода. В частности, у соединения $Pr_{0.65}Ca_{0.245}Sr_{0.105}MnO_3$ температура перехода 100 K. Это дает надежду создать на их основе новые устройства: детекторы излучения, миниатюрные ферромагнитные структуры и т.п.

Nature. 1997. V.386. P.813—815 (США).

Техника

Твердое топливо для высокоэффективных МГД-установок

Недавние открытия крупных месторождений полезных ископаемых — ре-

зультат изучения глубинного строения рудоносных и нефтегазоносных площадей методом комплексного геолого-физического исследования. Особое место в этом комплексе занимает измерение величин электропроводности и поляризуемости, поскольку они очень чувствительны к литолого-фациальным свойствам горных пород, к составу заполняющих поры и трещины флюидов и к их минерализации.

Повышение глубинности и разрешающей способности электроразведки определяется возможностями генераторов, зондирующих недра. Еще в 70-х годах в СССР были созданы источники импульсного тока на базе МГД-генераторов, превосходящие на два-три порядка даже ныне существующие в мире. Среди них — пороховые МГД-генераторы большой мощности (до 25 МВт), которые наиболее удобны для электроразведки благодаря малым габаритам. В таких генераторах низкотемпературная плазма создается при использовании порохов, содержащих компоненты с высокой электропроводностью продуктов сгорания (на четыре порядка превышающих электропроводность обычных порохов и ракетных топлив). Характерные составляющие порохов — легко ионизирующиеся элементы, как цезий или калий, и металлические наполнители — алюминий или его сплавы с магнием. Электрофизическая эффективность таких композиций довольно сильно зависит от того, какой используется металл — цезий или калий, и достигает соответственно величин 650 или 390 (См/м)(км/с^2). Однако нитрат цезия, который вводится в такие пороха, — более дорогой и экологически опасный продукт, чем нитрат калия.

Обычные плазменные баллистные топлива многокомпонентны. Помимо основных составляющих — тринитрата глицерина (NG), нитрата целлюлозы (NC), нитрата калия, порошкообразного сплава магния с алюминием, — в них содержится значительное количество наполнителей, обеспечивающих электрофизические и физико-механические свойства топлива.

Задача по созданию эффективных, экологически безопасных и недорогих топлив для МГД-генераторов была решена группой специалистов Федерального центра двойных технологий (ФЦДТ) «Союз», Российского химико-технологического университета им.Д.И.Менделеева и Центральной межотраслевой научно-технической лаборатории энергетических конденсированных систем под руководством Б.П.Жукова. Использование принципиально новых веществ и технологических подходов позволило разработать плазменные топлива нового поколения, отличающиеся от известных отечественных и зарубежных аналогов: они характеризуются в 1.5 раза возросшей электрофизической эффективностью; повышенной устойчивостью горения; на порядок большей полнотой сгорания алюминиевого наполнителя; лучшими деформационно-прочностными показателями; кроме того, температура использования разработанной композиции может варьироваться в пределах от –50 до 90°С.

МГД-установка «Союз» (мощность 16 МВт) при глубине зондирования 10—20 км и радиусе устойчивого приема импульса до 50 км позволит использовать многоканальную измерительную систему, ограничив время наблюдения, и перейти к реализации новой технологии интенсивного поиска нефти и газа. Если учесть, что при одном импульсе для работы МГД-генератора, используемого в электроразведке, требуется около 100 кг топлива, а для годовой работы группы — около 10 т, то ясно, что с созданием дешевых и экологически безопасных топлив решаются и проблемы конверсии — использование порохов в мирных целях.

© Д.Л.Русин,
кандидат технических наук
Москва

Биология

Черепахи-«транссексуалы»?

Феноменальный процесс наблюдали в Институте морских исследований в Северной Каролине. С 1968 г. здесь содержат крупных морских черепах — логгерхедов (*Caretta caretta*). Их выводили из собранных в природе яиц. В 1968 г. таким образом завели двух, а в 1977 г. — шесть особей. С первой «партией» все было в порядке: пара, оказавшаяся самцом и самкой, на момент написания статьи[1] прекрасно себя чувствовала и даже, насколько это возможно для морских черепах в неволе, пыталась размножаться. А вот со следующей группой произошло нечто странное: у четырех из них после достижения девятилетнего возраста стали меняться внешние признаки... половой принадлежности.

[1] Schwartz F.J. // The Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society. V.110. № 2. P.R97—103.

Вообще определить пол у черепах не очень сложно: самцы и самки различаются по размерам, форме головы и панциря и, главное, величине хвоста — у первых он гораздо длиннее.

По данным сотрудника института Ф.Шварца, проводившего наблюдения за черепахами, все шесть логгерхедов 1977 г. рождения до восьмилетнего возраста выглядели как безусловные самки. Но позднее у четырех из них хвост стал удлиняться, изменилась форма головы, и все эти трансформирующиеся черепахи начали проявлять интерес к остающимся «нормальными» самкам. Вскрытие погибшего «транссексуала» показало, что по всем признакам (развитию половых органов) это был настоящий самец. В то же время Шварц убежден в правильности первоначального определения этих необычных особей как самок. Если он прав, то обнаружен уникальный для пресмыкающихся случай смены пола. До сих пор это явление, вообще крайне редкое среди позвоночных животных, было известно только у некоторых рыб и травяной лягушки.

Феномен изменения пола, если он действительно имеет место у черепах, должен в корне изменить представления об эволюционном, экологическом и прикладном значении другого феномена — температурной детерминации пола, ставшей за последние годы известной у многих видов пресмыкающихся, но особенно значимой именно для морских черепах. Обнаружение факта появления самок при одних температурах инкубации и самцов — при других привело к формированию целого направления герпетологических исследований. С этим феноменом связывают многочисленные гипотезы — от вымирания динозавров до объяснения экологической специфики мест гнездования морских черепах. Программы сохранения и искусственного восстановления популяций этих животных в значительной степени базируются на определении оптимальной с точки зрения поддержания баланса полов температуры инкубации. Если же возможно постэмбриональное изменение пола, то все вроде бы установившиеся представления о механизмах поддержания «демографической» структуры популяций морских черепах нуждаются в корректировке.

У Шварца нет пока никаких четких соображений относительно возможных причин неожиданного изменения пола его подопечных. Все особи группы как в одинаковых условиях вылупились в результате инкубации, так в дальнейшем и содержались. Очевидно, причины изменения пола носят в большей степени эндогенный характер.

© Д.В.Семенов,
кандидат биологических наук
Москва

Биология

Пауки-динопиды

Пауки-динопиды, обитающие в тропических регионах Северного полушария и во всем Южном полушарии, демонстрируют одно из самых удивительных явлений в мире пауков. Особенности их поведения недавно исследовали в Коста-Рике Р.Гетти и Ф.Койле (R.M.Getty, F.A.Coyle; Западнокаролинский университет, Киллови, США).

Пауков-динопид (семейство *Deinopidae*) называют еще крупнолицыми пауками (ogre-faced spiders) — из-за очень больших задних срединных глаз. Наиболее известная черта биологии динопид — четырехугольная сеть, которую паук держит за углы двумя передними парами ног и использует как сачок-ловушку, накрывая им добычу. Лишь около десяти лет назад удалось показать, что эта небольшая сеть — частный случай круговых сетей пауков-кругопрядов.

По наблюдениям Гетти и Койле, пауки из рода *Deinopis* обычно зависают над горизонтальной поверхностью листа, держа над ним свою сеть на расстоянии 15—30 мм. Они способны к броскам вперед и назад. Удалось установить, что броски вперед вызваны преимущественно зрительными, а броски назад — вибрационными сигналами.

Авторы впервые описали защитное поведение динопид. Охотятся динопиды в ночное время, активно манипулируя своими сетями, а на восходе солнца собирают их, комкают и поедают, после чего вытягивают ноги и становятся похожими на сухие веточки. С субстратом паук соединяется с помощью паутины, касаясь его также одной-двумя парами ног. Как правило, в дневное время динопиды неподвижны. Камуфляж пауков очень надежен: даже сами ученые не смогли обнаружить динопид в дневное время.

Несмотря на тщательные исследования, в биологии этих пауков остается много неясностей. Так, не изучено, насколько выше продуктивность сети-сачка и

не используют ли динопиды дополнительно иные способы охоты. Не вполне понятно, как возникло криптическое поведение «паука-веточки».

Journal of Arachnology. 1996. V.24. № 2. P.93—100 (США).

Этология

Шмель марширует по «шоссе»

До сих пор энтомологи считали, что среди наземных насекомых, ведущих общественный образ жизни, только муравьи и термиты «строят дороги» и ходят колонной по одному. И лишь теперь американским исследователям С.А.Камерону и Дж.Б.Уитфилду (S.A.Cameron, J.B.Whitfield; Университет штата Арканзас, США) удалось наблюдать подобное поведение у одного из видов шмеля.

Они изучали строящих гнезда шмелей *Bombus transversalis*, которые населяют заповедник Тамбопата в юго-восточной части Перу. Хотя эти насекомые способны летать, очень часто они отправляются «пешком» за листьями, которые используют в качестве строительного материала.

«Дорожное строительство» начинается с того, что шмели прокладывают две тропы, симметрично отходящие с противоположных сторон гнезда. При этом они сперва расчищают себе «шоссе» шириной 9—10 см и длиной до 2 м. В случае если веточка, прутик или листочек преграждают им путь, помеху поспешно сталкивают. Когда дорога открыта, насекомые выходят на нее, «строясь в затылок». Через полтора месяца они расчищают еще три дорожки, направленные под 90 и 45° к прежним. За этот промежуток времени им удается, пользуясь принесенными материалами, сделать крышу над своим жильем толще и шире на 10 см.

Как известно, многие виды пчел помечают свои гнезда особым веществом (феромоном), запах которого в дальнейшем позволяет им находить дорогу домой. Делают ли так эти шмели, энтомологи намерены выяснить, продолжая исследования.

Science News. 1996. V.149. № 5. P.79 (США).

Этология

Смена специализации у муравьев

У ведущих общественный образ жизни насекомых, таких как муравьи, существует пожизненное разделение труда, и муравей, принадлежащий к касте, скажем, солдат, никогда не примет на себя труд рабочей особи.

Еще с 70-х годов энтомологи уподобляли гнездо муравьев сборочному конвейеру: количество «профессионалов» той или иной специализации довольно постоянно, отвечает максимальным потребностям сообщества и может меняться лишь со сменой многих поколений. Таков был общепринятый взгляд, базирующийся на здравом смысле: редкие попытки экспериментальной проверки этой гипотезы обычно содержали выводы о том, что никакие изменения внешнего положения колонии или возникновение угрозы для нее не ведут к переменам в численном соотношении муравьиных каст, однако они были малоубедительны с точки зрения самой постановки опытов. Кроме того, ни в одном подобном эксперименте не предпринималось прямого изменения среды обитания — чаще всего муравьев из одной колонии запускали в другую, а это быстро кончалось гибелью «пришельцев».

Иной подход к исследованиям предприняли энтомологи Л.Пассера (L.Passera; Тулузский университет им.П.Сабатье, Франция) и Л.Келлер (L.Keller; Лозаннский университет, Швейцария). Они взяли под наблюдение около 40 гнезд муравьев вида *Pheidole pallidula*, широко распространенного в Южной Франции, и провели следующий опыт. Сначала устранили из гнезд всех солдат, а численность рабочих особей сократили до 1100. Затем гнезда разбили на пары и соединили их с местом кормления общим туннелем, по которому муравьи могли совершать поход за капельками меда или за мучными червями. При этом туннель разделили вдоль перегородкой так, чтобы муравьи разных колоний не смешивались; в одних случаях перегородка представляла собой проволочную сетку, через которую муравьи могли касаться друг друга усиками и ногами, а в других — сплошную непрозрачную стенку.

Через семь недель в тех колониях, где муравьи знали о существовании «чужаков» за проволочной сеткой, численность солдат уже вдвое превышала таковую в колониях, муравьи которых не могли обнаружить конкурентов за сплошной перегородкой. Численность же рабочих особей в колониях первого типа значительно уступала по сравнению со вторым.

Еще раньше энтомологи знали, что будущая специализация муравьев четко определяется тем, как кормят личинку. Очевидно, рабочие, пробегая по туннелю и обнаруживая в нем «конкурентов», передавали информацию муравьям-нянькам, и те вносили в питание личинок коррективы, с тем чтобы у новорожденных появились качества солдата, который, как правило, больше по размеру, чем остальные. Так ли это у иных видов общественных насекомых, еще предстоит выяснить.

Nature. 1996. V.379. № 6566. P.583 (Великобритания); Science News. 1996. V.149. № 7. P.102 (США).

Этология. Экология

Хищник съест вредителя

В странах Средиземноморья и в Африке живет хищная муха *Coenosia attenuata* из семейства *Muscidae*, которая умеет прямо в полете вцепляться всеми своими шестью лапками в добычу. До недавнего времени она в Европе не встречалась и потому изучена была слабо. Однако в 1993 г. ее присутствие в нескольких немецких парниковых хозяйствах впервые обнаружил энтомолог Ш.Кюне с коллегами (S.Kühne; Федеральный центр биологических, сельскохозяйственных исследований и лесоводства, Брауншвейг, Германия). По-видимому, ценозия аттенуата попала сюда вместе с каким-то импортированным растением.

Для этой мухи характерно следующее поведение: схватив добычу, она возвращается на тот же листок, с которого взлетела, и, продырявив жертву в нескольких местах кинжалообразным «зубом» (видоизмененным хоботом), впускает в ее тело ядовитую жидкость. Затем другими «зубами» раздирает тело жертвы на части и путем так называемого внекишечного пищеварения разжижает их с помощью едких соков.

Проведя в течение двух лет эксперименты и наблюдения в теплицах Германии, Нидерландов и Италии, группа, руководимая Кюне, установила, что ценозия аттенуата обладает незаурядными способностями держать под контролем численность некоторых вредителей сельскохозяйственных растений, в том числе табачную белую муху бемизию (*Bemisia tabaci*). А это особенно важно потому, что на бемизию не воздействуют обычные виды инсектицидов.

По сообщению исследователей, в парнике, куда запущена была ценозия в количестве двух-трех особей на 1 м^2 посева, создается своего рода самоконтролирующаяся система: если количество вредителей недостаточно для питания хищников, самки ценозии начинают поедать самцов своего вида, и популяция сокращается. Более того, хищником является и безногая личинка ценозии: она поедает укрывающихся в почве личинок насекомых-вредителей.

Однако полностью очистить парник от вредителей эта муха не в состоянии, так как не замечает потенциальную добычу даже в миллиметре от себя, если та ползет по земле или растению: она поедает только то, что летит по воздуху. Поэтому в целях биологического контроля ценозию следует сочетать с другими насекомыми, например осами и пауками, которые охотятся и на ползущего вредителя.

Установлено, что для человека ценозия безвредна. В климатических условиях Северной Европы она в естественной среде, вне парника, не выживает, так что и для местных видов угрозы не представляет. Кюне разработал и засекретил методику массового разведения этой мухи. Одна компания, расположенная близ Штутгарта, уже приступила к разведению куколок и продаже ценозии фермерам, которые проявили к ней немалый интерес.

New Scientist. 1996. V.150. № 2024. P.10 (Великобритания).

Охрана окружающей среды

Микроорганизмы в местах захоронения радиоактивных отходов

На конференции Американского химического общества (сентябрь 1996 г., Орландо, штат Флорида) был представлен доклад группы микробиологов из нескольких национальных лабораторий США, которую возглавлял Б.Штрительмайер (B.Strietelmeier; Лос-Аламосская национальная лаборатория, штат Нью-Мексико). Исследования были предприняты в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов.

Микроорганизмы, населяющие подземные воды с высоким уровнем солености, подвергаясь воздействию радиоактивных веществ: плутония-239, нептуния-237, америция-243, урана-238 и тория-232. Установлено, что наиболее радиоактивный из них — америций — никакого вреда бактериям не приносит; ос-

тальные вызывают у бактерий замедление роста лишь в тех случаях, когда концентрация этих веществ превышает реальную для подземных хранилищ ядерных отходов.

Изученные виды микроорганизмов нередко встречаются в естественной среде, в том числе в грунтовых пластах солоноватой воды штата Нью-Мексико, поблизости от недавно сооруженного Министерством энергетики США экспериментального завода по изоляции радиоактивных отходов. Начиная с 1997 г. отходы американских предприятий, производящих ядерное оружие, предполагается «навечно» захоранивать именно в этом районе, который избран в связи с распространенностью здесь мощных соляных формаций: они отличаются геологической стабильностью и отсутствием заметных движений грунтовых вод, которые могли бы вынести на поверхность радиоактивные элементы. Однако вопрос их переноса микробами до сих пор всерьез не рассматривался.

Исследования авторов доклада на сканирующем электронном микроскопе показали, что у некоторых микроорганизмов на внешней стенке клетки накапливается ^{239}Pu, что представляется вполне естественным, так как бактерии обладают способностью концентрировать различные металлы, в том числе и тяжелые. Впрочем, общий риск считается незначительным: даже если такие микроорганизмы и станут прорываться к земной поверхности, более 99% из них будет отфильтровано геологическими породами, а оставшиеся долго не просуществуют, так как, приспособившись в ходе эволюции к жизни в солоноватых водах, эти бактерии быстро погибнут, попав в пресную среду. Тем не менее проблема заслуживает дальнейшего изучения.

New Scientist. 1996. V.151. № 2046. P.12 (Великобритания).

Охрана окружающей среды

Микробы против отравляющих веществ

Вооруженные силы США сейчас располагают примерно 35 тыс. т боевых отравляющих веществ (БОВ), находящихся в девяти хранилищах на территории страны. Принят закон, предписывающий к 2004 г. избавиться от всего этого запаса. Пентагон обратился к Национальной академии наук США с просьбой предложить методику уничтожения БОВ, исключая их сжигание, которое вызывает протесты многих общественных организаций, опасающихся загрязнения среды обитания. Созданная Академией группа из химиков, биохимиков, микробиологов, токсикологов и экологов, завершив исследования, предложила ряд новых методик.

На Абердинском армейском полигоне в штате Мэриленд хранится 1790 т горчичного газа, который может быть ликвидирован путем разложения водой, нагретой до 90°С, после чего продукты реакции «поедаются» одним из распространенных видов бактерий.

На военном складе в Ньюпорте (штат Индиана) находится 1400 т весьма опасного нервно-паралитического газа VX. От него можно безболезненно избавиться с помощью гидроксида натрия, причем продукты распада также потребляются определенным видом микробов.

Возможно, описанные способы применимы только в Абердине и Ньюпорте, где дело придется иметь лишь с одним видом БОВ, хранимом в крупной цистерне. На семи других складах размещено по нескольку различных БОВ, в том числе находящихся в мелких контейнерах или внутри средств доставки (в бомбах и снарядах). Здесь, вероятно, придется по-прежнему прибегать к сожжению.

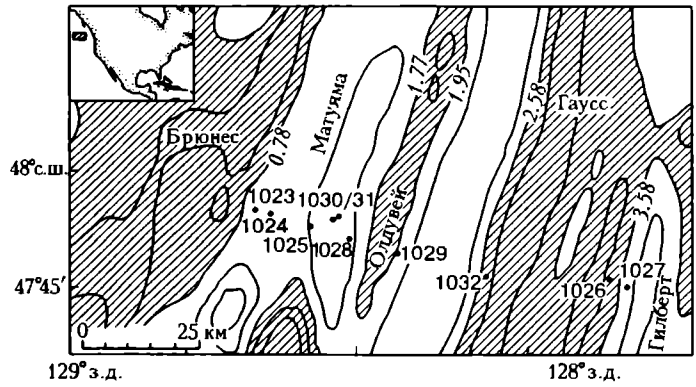
Один из экспертов, директор Центра по экологической инженерии при Технологическом институте штата Нью-Джерси в Ньюарке Р.Маги (R.Mahee) подчеркивает, что экологически более чистые методы химической нейтрализации БОВ технически вполне реальны, хотя обойдутся дороже, чем сжигание.

New Scientist. 1996. V.151. № 2050. P.10 (Великобритания).

Геология

168-й рейс «ДЖОЙДЕС Резолюшн»

Исследования в пределах срединно-океанических хребтов показали, что, хотя в их осевых частях ко́ровые флюиды имеют самую высокую температуру (до 350—400°С), наибольший суммарный поток гидротермального тепла наблюдается во фланговых частях хребтов, на значительном удалении от спрединговых центров. По некоторым подсчетам, объем морской воды, участвующей в гидротермальной циркуляции, здесь на порядок выше, чем в осевых частях хребта. Установлено, что флюидный обмен между



Район работ по Программе океанского бурения на восточном фланге хребта Хуан-де-Фука в северо-восточной части Тихого океана (показан на врезке). Цифрами на изолиниях показан возраст коры (млн лет); Гилберт, Гаусс, Матуяма, Брюнес — палеомагнитные эпохи; Олдувей — палеомагнитное событие эпохи Матуяма; заштрихованные участки — кора с обратной намагниченностью пород; незаштрихованные — с нормальной намагниченностью пород.

корой и океаном, который приводит к изменению физических и химических свойств океанской коры, продолжается до достижения ею возраста в несколько десятков миллионов лет, иначе говоря, эти процессы в каждый отрезок геологического времени охватывают не менее одной трети площади океанского дна.

Несмотря на то, что проблеме обмена флюидами между корой и океаном было посвящено в последние два десятилетия несколько специальных рейсов по программе глубоководного бурения в Тихом и Атлантическом океанах, это явление еще слабо изучено. Остаются неясными механизм циркуляции флюидов через океанскую кору и морское дно, масштабы химического обмена между корой и океанской водой. Не ясно также, каким факторам принадлежит решающая роль в этом процессе: что контролирует химический состав флюидов, и, как следствие, обусловливает химические и физические преобразования пород коры и осадочного чехла.

Решению этих вопросов и был посвящен 168-й рейс, который проводился с 20 июня по 15 августа 1996 г. в пределах восточного фланга хребта Хуан-де-Фука в северо-восточной части Тихого океана. Исследования осуществлялись под научным руководством И.Дэвиса (Геологическая служба Канады) и Э.Фишера (Калифорнийский университет, США), а также представителя Программы океанского бурения Дж.Фёрта[1].

Основные задачи рейса: изучение термофизических характеристик гидротермальной циркуляции в верхних частях коры на флангах срединно-океанического хребта и их связи с физическими свойствами коры и осадочного чехла; выявление зависимости состава флюидов от возраста, температуры коры и мощности осадочного чехла; выяснение природы физических и химических преобразований вещества коры; оценка масштабов тепло- и флюидообмена между корой и океаном.

Бурение в рейсе проводилось в 10 точках (1023—1032), в которых было пробурено в общей сложности 19 скважин. Точки бурения располагались вдоль субширотного профиля, пересекающего участки океанской коры разного возраста: от 0.8 млн лет (палеомагнитная эпоха Матуяма) до 3.6 млн лет (палеомагнитная эпоха Гилберт). Максимальное проникновение в породы (577.9 м) было достигнуто в точке 1027.

Хотя материалы рейса еще находятся в стадии обработки и результаты лабораторных исследований пока не опубликованы, предварительные данные свидетельствуют, что на многие из перечисленных вопросов будут получены ответы.

В рейсе было, в частности, установлено, что геохимические преобразования флюидами осадков, перекрывающих океанскую кору, происходят лишь в нижнем их слое толщиной всего несколько метров, независимо от общей мощности и состава осадочного чехла. Напротив, степень изменения изверженных пород коры (базальты, вулканическая брекчия, диабазы) зависит от температуры и возраста коры, ее состава и физических свойств, степени изолированности от морской воды. Например, оливины в самых молодых, наиболее холодных и расположенных вблизи контакта с морской водой базальтах, вскрытых в точке 1023, изменены в наименьшей степени, а оливины в массивных, крупнокристаллических базальтах, пробуренных скважиной 1025 на

[1] Davis E., Fisher A., Firth J. // Preliminary Report, Leg 168 ODP. College Station, 1996.

более древней коре, полностью замещены глинистыми минералами. С увеличением возраста пород и их температуры увеличивается и степень заполнения пор, которая также зависит от их близости к трещинам.

Установлено закономерное возрастание температуры на контакте изверженных пород коры и осадков по мере их удаления от участков выхода фундамента на поверхность дна — от 15°С в скважине 1023 до 22°С в скважине 1024 и 38°С — в скважине 1025. В то же время на расстоянии по крайней мере до 20-30 км от выходов фундамента значения теплового потока заметно ниже по сравнению с расчетными, что объясняется участниками рейса латеральной миграцией тепла в сторону участков выхода фундамента на дно.

Открытие феномена латерального переноса тепла на десятки километров — одно из важнейших достижений рейса. Оно заставляет пересмотреть существующие взгляды на баланс тепла в коре срединно-океанических хребтов и его перераспределение в процессе геологической эволюции.

© И.А.Басов,
доктор геолого-минералогических наук
Москва

Геология

Циркон, принесенный ископаемой рекой

В 1995 г. Дж.Джерелс и У.Дикинсон (G.Gehrels, W.Dickinson; Университет штата Аризона, Тусон, США) обнаружили кристалл циркона $Zr(SiO_4)$ в геологических формациях Особб (западная часть штата Невада) и Чинле (значительная часть штатов Аризона, Юта, Невада и Колорадо). Возраст кристаллов циркона, как оказалось, 515—525 млн лет, что крайне необычно: ранее в западной части всей Северной Америки породы такого возраста не были известны.

Еще раньше геолог Н.Риггс (N.Riggs; Северо-Аризонский университет, Флагстафф, США) высказывала предположение, что формация Чинле каким-то образом связана с аналогичными породами того же возраста, слагающими формацию Докум в северных районах Техаса. Ознакомившись с работой тусонских исследователей, Риггс собрала образцы циркона из докумских пород. Обратив особое внимание на бочкообразные желтоокрашенные кристаллы, сходные с невадскими, она обнаружила, что 8 из 17 таких кристаллов имеют возраст от 515 до 525 млн лет, что указывает с большой вероятностью на их одинаковое с кристаллами из Чинле происхождение — из района древних гор, некогда существовавших на территории Техаса и Оклахомы. В техасских образцах найдены также иные кристаллы, чей возраст позволяет поставить их рядом с отложениями формаций Особб.

Все это дает основание утверждать: в начале мезозойской эры, в триасе (около 235 млн лет назад), от Техаса на запад протекала огромная, длиной более 1500 км, река, устье которой располагалось на территории нынешней Невады, где в то время находилось побережье океана. Именно ее воды перенесли кристаллы циркона на столь значительное расстояние от его коренных залежей. Ныне горная Невада представляла собой в ту пору гладкую равнину.

Циркон хорошо противостоит процессам выветривания, а поэтому может свидетельствовать о древнейших геологических явлениях. Кроме того, он содержит медленно распадающийся радиоактивный уран, позволяющий датировать отдельные кристаллы и сопоставлять происхождение различных пород и формаций.

Риггс полагает, что великая ископаемая река, еще не доходя до территории нынешней Невады, разделялась на два очень крупных рукава, южный из которых впадал в океан около Особба.

Science. 1996. V.273. № 5271. P.97 (США).

Геотектоника

Стабилен ли Скандинавский щит?

К числу следствий теории плитовой тектоники относится предположение, согласно которому Скандинавия, представляющая собой исключительно древний и мощный щит земной коры, должна быть избавлена от высокой сейсмической активности. Однако такое представление ставится под сомнение работами шведского сейсмолога Р.Арвидссона (R.Arvidsson; Упсальский университет).

Он изучил характер разломов земной коры в Северной Скандинавии, которые возникли около 9 тыс. лет назад, т.е. непосредственно после таяния мощного покровного оледенения, занимавшего до того весь этот регион (первые из таких разломов были открыты геологами еще около 20 лет назад, но труднодоступность местности препятствует их дальней-

шему исследованию и обнаружению новых).

Анализ местонахождения эпицентров мелких землетрясений, происходивших здесь в 1963—1993 гг., свидетельствует об активности этих разломов и поныне. Сейсмические данные показывают, что они проникают до самого основания земной коры, на глубину до 40 км.

Имея представление о размерах разломов, Арвидссон делает заключение о мощи древнего землетрясения, которое оказалось в состоянии столь сильно нарушить земную кору. Стало очевидным, что наибольший из разломов послеледникового периода — разлом Пярви, протянувшийся на 160 км, был порожден мощнейшим землетрясением, магнитуда которого достигала 8.2 по шкале Рихтера. Другой разлом — Лансярв (длина около 50 км) возник в результате тоже очень сильного подземного толчка магнитудой 7.8.

Подобные этим внутриконтинентальные землетрясения в районах, которые расположены далеко от границы любой из плит земной коры, считаются сравнительно редкими. Среди них более или менее изучено событие, случившееся в 1811—1812 гг. в районе Нью-Мадрида (штат Миссури на Среднем Западе США). Здесь причиной серии толчков не могло послужить столкновение плит или трение их краев друг о друга.

Однако, по мнению сейсмолога А.С.Джонстона (A.C.Jonston; Мемфисский университет, штат Теннеси, США), здесь возникает некий геологический парадокс. Дело в том, что хотя землетрясение в пределах древней части плиты и является редкостью, зато оно обычно отличается значительной силой, так как разломы в холодной земной коре проникают на большую глубину. А на более молодых участках коры разломы не достигают ее нижней части, так как слагающие ее породы разогреты и потому благодаря своей пластичности способны не разрываться, а изгибаться. Тем самым выводы Арвидссона требуют дальнейших объяснений.

Послеледниковые разломы Скандинавии должны были бы иметь многочисленные аналоги в Северной Америке, которая тоже освободилась от гнета ледника, который ранее сковывал всю территорию современной Канады и значительную часть США. Тем не менее геологам пока удалось обнаружить лишь один небольшой отрезок разлома — в северной части провинции Манитоба (центральная область Канады). Поиск подобных разломов еще следует, очевидно, провести на значительной части страны.

Science. 1996. V.274. № 5288. P.744 (США).

Геотектоника

Откуда взялись Анды?

Происхождение Анд — одной из величайших на Земле горных систем, которая протянулась вдоль тихоокеанского побережья Южной Америки на 9 тыс. км, — составляет предмет оживленной дискуссии среди геофизиков и геотектонистов.

Согласно одной точке зрения, образование Анд связано с тем, что земная кора Южно-Американского континента в восточной своей части имеет сравнительно большую жесткость, чем в западной, где ее «смягчают» тепловая энергия и вулканизм, возникающие в ходе погружения океанической литосферной плиты в Перуанско-Чилийский желоб. При этом западная окраина континента почти неподвижна, а восточная «давит» на нее, что и приводит к тектоническому скучиванию и воздыманию земной коры. Но дело не только в этом.

Полагают, что главной силой в данном случае служит расширяющийся Срединно-Атлантический подводный хребет, давление которого передается в горизонтальном направлении и подталкивает континент в лежащую западнее литосферную плиту.

Оппонент этой гипотезы П.Силвер (P.Silver; Институт им.Карнеги, Вашингтон, США), использовав модели распределения сил в недрах региона, которые были построены П.Мейджером (P.Meijer; Утрехтский университет, Нидерланды), пришел к заключению, что давление хребта впятеро меньше, чем необходимо для перемещения гигантской Южно-Американской плиты. По мнению Силвера и его сторонников, сила давления должна быть подкреплена мощным течением вещества мантии у основания континентальной плиты, как бы «затягивающим» его в западном направлении.

Им возражает геофизик Р.Кобленц (R.Coblentz; Университет штата Аризона, Тусон, США). Он считает, что Силвер преувеличивает силы, необходимые для воздымания Анд. Если «затягивающий» эффект и существует, его величина должна быть пренебрежимо мала по сравнению с воздействием расширяющегося Срединно-Атлантического хребта. Аризонские исследовате-

ли рассчитали силы давления в пределах Южно-Американской плиты, при этом они опирались на данные 300 различных измерений, которые были сведены воедино М.Л.Зобак (M.L.Zoback; Геологическая служба США, Менло-Парк, штат Калифорния); эта работа представляет собой часть крупномасштабного международного проекта «World Stress Map» («Мировая карта давлений»).

Согласно этим новым расчетам, явления, создающие и поддерживающие Анды в их нынешнем состоянии, находятся в пределах 10—20 МПа, т.е. близки к тем значениям, которые отвечают гипотезе «подталкивания» со стороны Срединно-Атлантического хребта. Такое заключение подкрепляет мнение тех ученых, кто считает, что плиты земной коры отделены от нижележащей мантии астеносферой — слоем со сравнительно малой вязкостью, играющим роль «смазки».

New Scientist. 1996. V.149. № 2014. P.20 (Великобритания).

Геофизика

Из подводного вулкана рождается остров

Согласно теории «горячей точки», поднимающийся от нее «столб» магмы «проплавляет» медленно перемещающуюся над ней литосферную плиту. При этом возникает цепь вулканов. Удобным местом для наблюдения таких процессов служит дно Тихого океана в 35 км к юго-востоку от о.Гавайи — крупнейшего в архипелаге. Здесь под водой находится действующий вулкан Лоихи, который питается магмой от мощного «столба» расплавленных в недрах пород. Изверженная лава образовала на дне океана гору, которая возвышается на 3500 м и продолжает расти. Ныне ее вершина кроется в 980 м под поверхностью моря.

Ученые пришли к выводу, что менее чем через 100 тыс. лет этот вулкан поднимется над водой и станет новым островом. Но, несмотря на свою молодость, Лоихи до сих пор демонстрировал геофизикам лишь слабые косвенные свидетельства своей активности. Чтобы улучшить возможности наблюдения, геологи и геофизики Гавайского университета в Гонолулу во главе с Ф.Дюннебиром (F.Duennebier) намеревались установить на вершине подводной горы автоматическую обсерваторию, которая круглосуточно собирала бы сейсмо- и вулканологические данные и телеметрически передавала их на сушу.

Однако 16 июля 1996 г. на склонах вулкана Лоихи началась серия непрерывных мелких землетрясений. За первые 10 сут число подземных толчков превысило 4 тыс. (у 80 из них магнитуда составляла более 4 по шкале Рихтера). Когда к месту событий приблизилось научно-исследовательское судно «Каимикаи О Каналоа», весь его корпус дрожал от сотрясений, говорящих о том, что Лоихи окончательно проснулся. Несмотря на опасность, за борт была спущена исследовательская подводная лодка с тремя специалистами. Но изверженные вулканом газы и частицы пород сделали воду уже на расстоянии 1 м от иллюминатора совершенно непрозрачной.

Впрочем, для эхолокатора кругового обзора это не стало неодолимым препятствием. К своему удивлению, специалисты обнаружили, что участок склона горы протяженностью 260 м соскользнул внутрь кратера метров на 300 — видимо, к этому привело резкое перемещение лавы в глубине вулканического конуса. Такого явления вулканологи под водой еще никогда не наблюдали.

С интересным феноменом столкнулись и геохимики. В частности, они обнаружили, что вблизи вулкана морская вода почти не содержит солей. Специалисты объяснили это тем, что извержение было настолько мощным, что вызвало бурное кипение воды и в результате ее сильное опреснение.

Столь подробные исследования извержений на дне океана никогда еще никем не велись. Ученые считают, что ранее делавшиеся оценки времени, через которое может появиться на свет новый остров, были преувеличены. События, происходящие на вершине и склонах самого молодого из вулканов Гавайской вулканической гряды, продолжают оставаться под тщательным наблюдением представителей различных наук о Земле.

Smithsonian Institution Bulletin of the Global Volcanism Network. 1996. V.21. № 7. P.2 (США).

Геофизика

Энерговыделение приливов

Известно, что силы притяжения Луны (в меньшей степени — Солнца) вызывают приливы в морях и океанах Земли. Аналогичные, хотя и менее заметные, приливы ощущает и твердое тело планеты, по обеим сторонам которой

возникают «выступы» высотой около 30 см, ежесуточно «обегающие» вокруг нее по мере вращения Земли. Так как вещество планеты не идеально упругое, она как бы «сопротивляется» влиянию их гравитационных сил, искажающих ее форму. На такую реакцию уходит некоторое время. Его можно измерять по изменению (хотя и незначительному) орбит искусственных спутников. Однако здесь есть затруднение: приливы в океане намного сильнее воздействуют на спутники, чем приливы, происходящие на суше, и тем самым скрывают их эффект.

Специалисты давно предполагали, что земные приливы происходят с неким запозданием, но точно измерить его до сих пор не удавалось. Недавно это смогла сделать группа сотрудников во главе с Р.Реем (R.Ray; Центр космических полетов им.Годдарда НАСА, Гринбелт, штат Мэриленд, США). Они использовали данные, полученные с борта американо-французского ИСЗ «TOPEX-Poseidon», на котором установлены радиолокационные альтиметры, способные с большой точностью измерять высоту поверхности моря в любой его точке. Исследователи скорректировали высоты орбит ИСЗ, внеся поправку, вызываемую морскими приливами, и установили время отставания в реакции Земли на приливные силы. Оно оказалось равным около 20 с, т.е. времени, за которое наша планета «проворачивается» примерно на 0.08°.

Интересно, что определение запаздывания позволяет найти энерговыделение, порождаемое приливными движениями Земли, которое затем рассеивается в пространстве в виде тепла. Эта величина оценивается в 83 ГВт, что более чем вдвое превышает среднее количество энергии, производимой, например, всеми электростанциями Великобритании.

Для геофизиков важно, что изучение земных приливов теперь позволит с новой точностью судить о внутреннем строении Земли — ведь возбужденные приливами сдвиги проникают до самого ядра и дают возможность измерять среднюю вязкость вещества планеты.

Nature. 1996. V.381. № 6583. P.595 (Великобритания).

Геофизика

Магнитная история Земли удревняется

По одной из гипотез, циркулирующие в земном ядре потоки расплавленного вещества, содержащие наряду с другими элементами железо, генерируют магнитное поле планеты. Его направленность один раз в несколько сот тысяч лет изменяется на обратную. Косвенные свидетельства таких смен имеются вплоть до времени, отстоящего от нас на 3.45 млрд лет, но когда этот процесс в действительности начался, до сих пор оставалось неясным, тем более, что изученные геологические породы, прямо на него указывающие, имели возраст не более 2.7 млрд лет[1].

Новые свидетельства относительно этого явления представлены геомагнитологами П.У.Лэйером (P.W.Layer; Университет штата Аляска, Фербэнкс, США), А.Крёнером (A.Kröner; Университет им.И.Гутенберга, Майнц, Германия) и М.Макуильямсом (M.McWilliams; Станфордский университет, США).

Руководимая ими группа исследователей, работая в северо-восточной части ЮАР, обнаружила плутон — выход на поверхность магматического тела, образовавшегося при застывании магмы на глубине. В течение миллиардов лет эрозия разрушила вышележащие слои, и магматическое тело диаметром 30 км обнажилось на поверхности.

Эта интрузия содержит богатые железом частицы, закономерно ориентированные вдоль магнитно-силовых линий планеты в эпоху, когда магма изливалась. Примерно 3.2 млрд лет назад магматическая масса охладилась, а частицы «застыли» в прежнем расположении, уже не соответствующем изменявшемуся с тех пор направлению магнитного поля планеты.

Исследователи установили, что породы вблизи окраин интрузии ориентированы почти точно в обратном направлении относительно ее срединной части, что вызвано, по их мнению, обращением магнитного поля в течение тех нескольких миллионов лет, пока это магматическое тело медленно остывало. Внешние слои, естественно, остыли раньше и зафиксировали его направление до того, как обращение завершилось.

Теоретически не исключено, что интрузия подвергалась повторному разогреву в результате вулканической активности. Однако авторы отвергают эту вероят-

[1] Возраст гнейсов Исуа в Гренландии оценивался в 3.8 млрд лет, а кристаллов циркона в осадочных толщах Западной Австралии — в 4.1—4.3 млрд лет. Подробнее см.: Пущаровский Д.Ю. Древнейшие породы Земли // Природа. 1990. № 12. С.109.

ность в данном случае, основываясь на изучении радиоактивного распада присутствующих в интрузии элементов. По имеющимся данным, она избежала существенного вторичного разогрева. Правда, геомагнитолог Р.Ван Дер Воо (R.Van Der Voo; Университет штата Мичиган, Анн-Арбор) все же считает подобное перемагничение пород возможным. Ему возражает Дж.Меерт (J.G.Meert; Университет штата Индиана, Терре-Хот), который задокументировал несколько позднее, но тоже архейское обращение магнитного поля Земли по образцам пород с территории Кении. Он считает доказательства Лэйера и его коллег достаточно убедительными.

Science. 1996. V.273. № 5277; Science News. 1996. V.150. № 7. P.103 (США).

Сейсмология

Землетрясения и безопасность

В рамках Международного десятилетия по уменьшению последствий стихийных бедствий (International Decade for Natural Disasters Reduction; 1990—2000) в январе 1997 г. в Кобе (Япония) проходил международный симпозиум по землетрясениям и безопасности. Организованный Центром по улучшению здоровья Всемирной организации здравоохранения, симпозиум собрал более 200 экспертов из 22 стран, впервые обсуждавших эти проблемы комплексно.

За последние 30 лет число крупных землетрясений с катастрофическими последствиями постоянно увеличивалось: в 60-х годах в мире произошло 89 таких событий, в 70-х — 139, а в 90-е годы — 392, т.е. возросло в 4 раза. Напомним наиболее сильные из них: в Китае (1976, погибло 242 тыс. чел.); Гватемале, (1976, 22 тыс. погибших); Мехико-Сити (1985, 5 тыс. жертв); Спитаке, Армения (1988, 25 тыс. погибших при материальном ущербе в 14 млрд долл.); Иране, (1990, убито 7 тыс. чел., нанесен ущерб на 7 млрд долл.); Кобе (1995, более 6300 чел. погибло, 30 тыс. получили ранения, 300 тыс. потеряли кров, финансовые убытки составили 100 млрд долл.).

Как отметили участники симпозиума, рост катастрофических последствий от землетрясений вызван не только более частыми или более мощными физическими процессами, но также уязвимостью населения, в особенности городской бедноты (в районах ее проживания до 80% смертных случаев связано с ветхостью старого жилья, неспособного противостоять сейсмическим ударам). Это обстоятельство необходимо иметь в виду при развертывании строительства в сейсмоопасных зонах, особенно важно учесть, что с 2000 г. половина населения земного шара будет проживать в городах, а к 2025 г. городское население составит 80%.

Симпозиум обсудил различные аспекты, связанные со снижением уязвимости людей. Тысячи переживших катастрофическое землетрясение остаются полностью или частично недееспособными, их психологический и социальный ущерб невозможно измерить; посттравматический стресс у многих жертв землетрясения сохраняется еще надолго после события.

Необходимость специальной подготовки к чрезвычайным ситуациям и быстрота реагирования на них мирового сообщества были осознаны в ходе спасательных операций: например, после землетрясения в Кобе 65% спасенных были найдены в первые 24 часа; во время Армянского землетрясения те же 65% спасенных были извлечены из-под развалин в первые 18 часов.

Главный урок, приобретенный при ликвидации последствий землетрясений, — оперативность доступа спасателей в зону бедствия. Поэтому первостепенная задача — развивать собственные возможности для снижения своей уязвимости.

World Health Organization. Press Release № 8. 24 January 1997 (Швейцария).

Сейсмология

Восток и Центр США сейсмичны

На территории США наиболее подверженными сейсмическому риску обычно считают тихоокеанский Запад (штаты Калифорния, Вашингтон и область Скалистых гор) и Юго-Запад (штаты Аризона и Нью-Мексико). Однако в последнее время специалисты все чаще обращают внимание на противоположную сторону континента — территорию примыкающих к Атлантике штатов Коннектикут, Род-Айленд, Южная Каролина и Джорджия, а также на центральный штат страны — Миссури.

К этому их побуждает анализ сейсмических событий прошлого. Так, в начале 1800-х годов Средний Запад трижды подвергался катастрофическим землетря-

сениям — настолько сильным, что колокола самопроизвольно зазвонили в Бостоне, на расстоянии около 1700 км от места события, а р.Миссисипи временно потекла вспять. Теперь очевидно, что все эти толчки в начале XIX в. были вызваны движениями земной коры по ее разломам, существующим вблизи города Нью-Мадрид (южная часть штата Миссури). Эта система разломов (как и некоторые другие на Среднем Западе) образовалась по меньшей мере 500 млн лет назад в процессе рифтогенеза — растяжения коры при раздвижении континентов. Такие рифты надолго остаются областью высокой сейсмичности.

На конференции Американского сейсмологического общества (Сент-Луис, апрель 1995 г.) С.Маршак и Т.Паулсен (S.Marshak, T.Paulsen; Университет штата Иллинойс, Шампейн) сообщили, что в среднеконтинентальной части США насчитывается более сотни зон разломов и складчатости, которые вызваны событиями, подобными тем, что породили разломную систему Нью-Мадрид. Они также находят общие черты у этих разломов с наблюдающимися в высокосейсмичной зоне Красного моря.

В центральной части США одни разломы протягиваются с юго-востока на северо-запад, другие — с юго-запада на северо-восток. Опасность землетрясения особенно велика там, где разломы одного вида пересекаются с разломами другого.

Как правило, крупные разломы, активные в течение длительного времени, проявляют себя значительными сдвигами земной коры: так, отрезки коры по разные стороны разлома Сан-Андреас за последние 5 млн лет продвинулись относительно друг друга на несколько сот километров. В то же время разломы на Среднем Западе, хотя и старше на сотни миллионов лет, свидетельств столь значительных перемещений коры не имеют. Однако Маршак и Паулсен считают, что это делает сейсмический риск на Среднем Западе довольно высоким: вместо постоянного движения одного определенного разлома в течение длительного времени некоторые из взаимно пересекающихся разломов могут становиться активными на недолгий в геологическом смысле период. При этом следующие друг за другом движения различных разломов могут как бы взаимно «ликвидировать» свои последствия: блоки земной коры теснят друг друга то взад, то вперед, и общего крупного смещения не происходит. Вероятность столь мощных землетрясений, как в XIX в., сейчас здесь невелика, но полностью их исключать нельзя.

New Scientist. 1996. V.150. № 2025. P.17 (Великобритания).

Сейсмология

Крип предсказывает землетрясение

Сейсмологам давно известен крип — едва различимое движение верхнего слоя земной коры, происходящее обычно в плоскости ее разлома. Особенно часто крип случается в пределах крупных сдвиговых разломов, где соседствующие плиты земной коры трутся друг о друга.

Связь крипа с сейсмической активностью очевидна. Первое практическое использование этого явления в целях прогноза землетрясения удалось К.Тербер (C.Thurber; Университет штата Висконсин, Мадисон, США).

Между октябрем 1995 г. и январем 1996-го он вел детальные наблюдения крипа на ослабленном отрезке разлома Сан-Андреас (Калифорния) — к югу от того участка, разрыв которого сопровождался катастрофическим землетрясением, разрушившим Сан-Франциско в 1906 г.

За время наблюдений было отмечено пять эпизодов крипа, когда смещение земной коры достигало 3 мм менее чем за одни сутки. На основании этого Тербер предсказал, что в течение пяти суток каждый из эпизодов должен завершиться землетрясением магнитудой более 3.3 по шкале Рихтера. В четырех случаях прогноз подтвердился, а в пятом толчок случился через 16 ч после истечения указанного срока. Кроме того, произошло еще два землетрясения, не предусмотренных прогнозом. Все эти толчки имели очаги на глубине от 2 до 10 км и магнитуду от 3.3 до 5. Тербер полагает, что крип служит «зеркальным отражением» того, что происходит на глубине. Однако этот метод имеет свои ограничения. При анализе архивных данных за 1970—1994 гг. установлено, что связь между крипом и землетрясением обнаруживается в районах с высоким уровнем сейсмической активности, да и то немногим более, чем в половине случаев.

Кроме того, единственный способ измерить крип — наблюдать за деформацией проволоки, натянутой перпендикулярно разлому, а для этого он должен быть виден на земной поверхности. Поэ-

тому землетрясение, связанное, например, с подводным разломом (как в Кобе в 1995 г.), предсказать методом наблюдения крипа нельзя. С другой стороны, на Земле (в Турции, в Новой Зеландии) немало сдвиговых разломов на суше, где новый метод вполне применим. Особенно перспективно его использование для прогноза наиболее сильных подземных толчков, приводящих к катастрофическим последствиям.

Nature. 1996. V.380. № 6573. P.425 (Великобритания).

Сейсмология

Сланцы смягчают толчок

Взаимодействие Тихоокеанской литосферной плиты с Североамериканской, при котором одна из них «соскребает» геологические породы с другой, должно приводить, согласно существующим представлениям, к сильным и многочисленным землетрясениям. Однако в южной части Калифорнии, где такое взаимодействие, несомненно, происходит, подземные толчки, регистрируемые в наше столетие, относительно редки и слабы. Объяснение этому предлагают геологи Х.Магистрале (H.Magistrale; Калифорнийский университет, Сан-Диего) и Хуа Вэйчжоу (Хьюстонский университет, штат Техас).

По данным, описывающим все местные землетрясения в Южной Калифорнии между 1981 и 1994 гг., исследователи установили местоположение и глубину 37 тыс. толчков, обнаружив при этом, что в ряде случаев очаги землетрясений, которые происходили

Карта-схема Южной Калифорнии. Черным показаны поверхностные выходы сланцев. Залегания сланцев в пустыне — серым.

близко друг от друга, лежали на глубинах, разнящихся на 4—10 км.

Это означает, что мощность и свойства поверхностных слоев земной коры меняются с глубиной весьма резко.

Известно, что магнитуда землетрясения зависит от прочности пород, в которых происходит разрыв. Сланцы обладают большей «мягкостью» по сравнению с другими породами внешних слоев Земли, поэтому на глубине они «не рвутся», что и снижает магнитуду толчка.

В южной части Калифорнии обнажения сланцев встречаются нередко. Судя по последним данным, обширные районы по обе стороны хорошо изученного разлома Сан-Андреас лежат поверх сланцевых пород. То же можно сказать и о районах, находящихся западнее, также под морским дном — напротив Ньюпорт-Инглвудского разлома, который, кстати говоря, проходит через весьма плотно заселенную местность и, в случае отсутствия там сланцевых пород, мог бы стать местом катастрофических событий.

Авторы считают, что именно сланцы служат «мягкой прокладкой», которая уберегает Южную Калифорнию от крупных сейсмических событий. Они полагают также, что установление зависимости энергии толчка от структуры пород может быть использовано для прогнозирования сильных землетрясений не только в Калифорнии, но и в других сейсмоактивных районах планеты.

Геофизик Х.Канамори (H.Kanamori; Калифорнийский технологический институт, Пасадена), в целом одобривший эту работу, в то же время напомнил, что, независимо от распределения геологических пород в недрах, их температуры могут отличаться более чем на 50°С даже в пунктах, отстоящих менее чем на 150 м друг от друга. Поэтому, считает он, усовершенствованный прогноз величины магнитуд возможен лишь

после того, как будут проведены многочисленные измерения теплового потока в недрах.

Science. 1996. V.273. № 5275; Science News. 1996. V.150. № 5. P.68 (США).

Сейсмология

Монгольский урок для калифорнийских сейсмологов

В 1957 г., как бы знаменуя только что начавшийся Международный геофизический год, мощное землетрясение — магнитуда толчка достигала по меньшей мере 8 по шкале Рихтера — охватило Гоби-Алтайский район на севере Монголии. Сдвиговый разлом земной коры протяженностью 250 км внезапно активизировался, вызвав катастрофическое событие, не приведшее к массовой гибели людей и огромным разрушениям лишь благодаря малой заселенности района.

Ныне, изучая это явление, российско-американо-монгольская группа сейсмологов обратила внимание на то, что в нем участвовал не только огромный сдвиговый разлом, но и целая система более мелких надвиговых разломов длиной примерно по 50 км, находящихся главным образом под поверхностью пустыни Гоби.

Специалисты указывают на значительное сходство сейсмогеологических условий этого района Монголии с центральной и южной частями штата Калифорния. Так, известный разлом Сан-Андреас очерчивает северную границу гор Сан-Габриэль, подобно тому как Гоби-Алтайский — северные пределы Алтая. Это исключительно протяженные разломы; в случае толчка участки коры по одну их сторону смещаются горизонтально относительно противоположной стороны. И в Калифорнии, и в Монголии к сдвиговым разломам примыкает множество надвиговых, смещающих кору в вертикальном направлении и создающих давление на близлежащие горные системы.

В прошлом большинство сейсмологов не представляло себе, что оба вида соседствующих разломов могут активизироваться одновременно. Изучение Гоби-Алтайского землетрясения показало, что это вполне возможно.

Поскольку разлом Сан-Андреас проходит непосредственно и с севера, и с востока от Лос-Анджелеса с его многомиллионным населением, а более мелкие разломы находятся непосредственно под городом, — все это указывает на особенно высокий сейсмический риск.

Некоторые оппоненты отрицают справедливость сейсмических аналогий Монголии и Калифорнии; они подчеркивают, что напряжения в разломах Гоби-Алтайского региона вдесятеро меньше, чем в районе Сан-Андреас. Кроме того, территория Монголии лежит на значительном удалении от границы любой из тектонических плит, тогда как Лос-Анджелес расположен непосредственно на стыке Тихоокеанской плиты с Северо-Американской.

По-новому поставленная проблема вызвала среди специалистов активную дискуссию.

Geology. 1996. V.24. № 7. P.579 (США).

Геофизика

Электромагнитное излучение разрушающихся пород

Процесс механического разрушения горных пород Земли сопровождается специфическим электромагнитным излучением, которое может быть предвестником сейсмических явлений.

Группа специалистов Института геофизики государственного сейсмологического бюро в Пекине во главе с Цянь Шуцином (Shu-Qing QIAN) получила записи интенсивности электромагнитного излучения образцов, подвергаемых разрушению прессом (синхронно производилась запись на акустический приемник). Образцы имели форму призмы и параллелепипеда с размерами 14×14×28 см и 12×20×36 см, соответственно.

Изучены 50 индивидуальных образцов десяти типов горных пород, которые входят в три главных генетических класса: осадочные (крупно- и мелкозернистые песчаники, доломиты); метаморфические (мраморы, гнейсы); магматические (граниты тонко- и грубозернистые, порфиритовые, диориты; гранодиориты; кварцевые диориты; сиениты). Приложенное к образцам давление варьировалось в диапазоне 8÷161 МПа. Измерение электромагнитных излучений проводилось в четырех диапазонах частот: очень низкие (20 Гц — 10 -КГц), средние (530 и 650 КГц, 1.65 и 2.3 МГц), высокие (5 и 16 МГц) и очень высокие (95 МГц). Сигналы принимались антеннами, удаленными на 2 м от образцов; во всех диапазонах их амплитуды не превышали ≈10 мВ.

Выявлены следующие характерные особенности: 1 — асинхронность прихода импульсов на антенны (первыми приходят очень низкочастотные импульсы; спустя ≈270 мс — импульсы на средних, высоких и очень высоких частотах); 2 — анизотропия излучения (интенсивность сигнала зависит от направления на образец; интенсивность в антенне очень низкочастотного диапазона, направленной на трещину в образце, была в два раза выше, чем в такой же антенне, направленной на целую грань образца); 3 — для получения сигнала, который может быть надежно принят антенной, необходимо прилагать к образцу давление, превышающее предел прочности породы данного типа.

Зафиксированное электромагнитное излучение авторы приписывают быстрым перемещениям статически заряженных поверхностей разломов твердых тел. Эксперимент показывает реальность многих, наблюдавшихся прежде, но так и не получивших объяснения явлений (в частности, значительное зашумление и нарушение радио- и телевизионной связи), которые происходят вблизи эпицентров землетрясений за некоторое время до сейсмического удара на поверхности. Наблюдаемые мощные и весьма длительные последовательности шумовых сигналов — это суммы элементарных актов излучения, происходящих при хаотическом столкновении граней огромного числа микрокристаллов разрушающихся горных пород в области эпицентра.

Acta Seismologica Sinica. 1996. V.9. № 3. P.447—454 (Китай).

Геотектоника

«Скоростная» тектоническая плита

Как известно, магнитное поле Земли периодически меняет свое направление на противоположное. Благодаря содержанию в горных породах магнитных минералов эти инверсии остаются зафиксированными[1]. В частности, в линейных магнитных аномалиях океанов отражена последовательность извержений магматических пород: в застывшей лаве, которая образовала участок молодой коры, содержащиеся в ней металлы сохранили именно то направление магнитного поля Земли, какое существовало на момент излияния лавы.

Определив возраст чередующихся магнитных полос морского дна, можно судить о скорости раздвижения плит для любого периода путем измерения расстояния между полосами.

До сих пор считалось, что наибольшей скоростью дрейфа обладает Тихоокеанская литосферная плита в районе к югу от о.Пасхи: около 15 см/год, что примерно равно скорости роста человеческих волос. Однако теперь этот «рекорд», по крайней мере в отношении прошлого, пересматривается.

Геофизик Д.Уилсон (D.Wilson; Университет штата Калифорния, Санта-Барбара, США) проанализировал весь массив палеомагнитных данных, которые собраны за последние 30 лет относительно Тихоокеанского региона и охватывают период между 18 и 11 млн лет назад. Он сопоставил также характер обращений магнитного поля в породах океанского дна с аналогичными данными для надежно датированных отложений геологических пород из других регионов. Стало ясно, что некоторые из магнитных полос намного моложе, чем полагали ранее, а значит, скорость движения данной плиты была существенно занижена. На самом деле в период между 18 и 11 млн лет назад эта скорость достигала 18—20 см/год.

Geophysical Research Letters. 1996. V.23. P.3003 (США); New Scientist. 1996. V.152. № 2052. P.21 (Великобритания).

[1] Подробнее см., напр.: Сузюмов А.Е. Магнитная стратиграфия палеогена // Природа. 1983. № 5. С.114—115.

Геотектоника

Когда Аргентина была частью Техаса

В соответствии с теорией плитовой тектоники площадь континентов обычно увеличивается в процессе «прирастания» к ним отдельных участков земной коры, именуемых террейнами. Считается, что террейны прежде представляли собой острова, находящиеся в центре океана, или же фрагменты более древних материков, дрейфовавших до момента своего соприкосновения с тем или иным континентом. Однако до сих пор специалистам не удавалось построить точные карты подобных дрейфов. По всей видимости, это смогли сделать геотектонисты У.Томас (W.Thomas; Университет штата Кентукки, Лексингтон, США) и Р.Астини (R.Astini; Национальный университет в Кордове, Аргентина), которые изучали

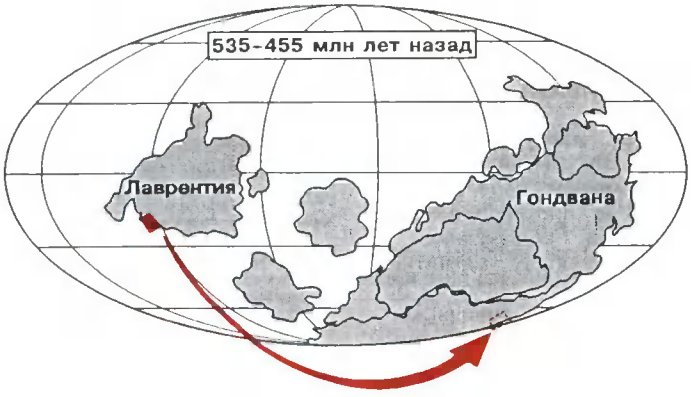


Схема дрейфа оторвавшегося от Лаврентии мини-континента Прекордильеры к Гондване.

геологию юго-востока Южной Америки.

В раннем кембрии, т.е. около 535 млн лет назад, вся Северная Америка еще входила в состав праконтинента Лаврентия, лежавшего вблизи экватора. В тот период через территорию, ныне представляющую собой восточную часть штата Техас, прошел разлом Уачита. Он отделил от праконтинента участок величиной около 600 тыс. км^2. Между 525 и 515 млн лет назад этот мини-континент, именуемый Прекордильерой, продрейфовал в направлении на юго-восток примерно на 800 км. В процессе дрейфа он длительное время (между 495 и 470 млн лет назад) оставался в островной изоляции, о чем свидетельствуют палеонтологические данные: никаких новых организмов, относящихся к той эпохе, на нем тогда не появилось. Новые виды здесь обнаруживаются лишь спустя десятки миллионов лет, когда Прекордильера сблизилась с суперконтинентом Гондваной, включавшим современные Южную Америку, Африку, Индостан, Австралию и Антарктиду. Столкновение Прекордильеры с Гондваной произошло, вероятно, около 455 млн лет назад. В этот период Прекордильера подверглась значительному сжатию, вызванному как столкновениями с другими террейнами, так и субдукцией (погружением в недра отдельных плит земной коры, что параллельно привело к образованию Анд).

Согласно заключению исследователей, нынешний крупный участок восточных предгорий Аргентинских Анд в геологическом отношении представляет собой переместившийся по океану на тысячи километров фрагмент южной части территории США, граничащей с Мексиканским заливом. Сейчас этот участок простирается в длину на 1 тыс. км при ширине 100 км.

Ранее геофизикам был известен лишь один хорошо документированный аналогичный случай: так называемая Авалония (ныне это северные приатлантические штаты США, или Новая Англия, и Новая Шотландия — крайний юго-восток Канады и Британские о-ва) совершила дрейф на запад в то самое время, когда Прекордильера перемещалась на восток.

По мнению Томаса, эти огромные участки суши двигались в противоположном направлении и оказались по разные стороны трансформного разлома. Специалистам предстоит проанализировать сейсмические данные, касающиеся Аргентины и юга Северной Америки, с целью обнаружения новых свидетельств разлома в Техасе, который привел к отрыву Прекордильеры от своего исходного массива.

Science. 1996. V.273. № 5276. P.752 (США).

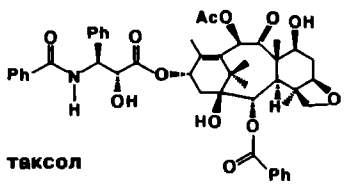
Химия

Синтез противораковых препаратов

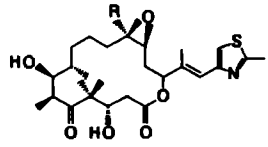
Получивший одобрение клиницистов препарат таксол, останавливая пролиферацию (размножение) клеток, предотвращает и рост раковых новообразований. Это натолкнуло исследователей на поиски других веществ аналогичного действия.

Из культурной линии миксобактерий *Sorangium cellulosum* был в свое время выделен эпотилон А. В опытах *in vitro* это вещество проявило даже большую эффективность, чем таксол.

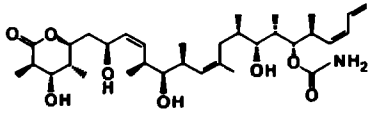
Как уже неоднократно отмечалось клиницистами, лекарственные препараты с аналогичным действием часто оказываются различными по составу и химическому строению. То же можно сказать в отношении таксола, дискодермолида и аналогов эпотилона: отличаясь по строению и составу, все они действуют на микротубулы клеток, подавляя их рост.



таксол

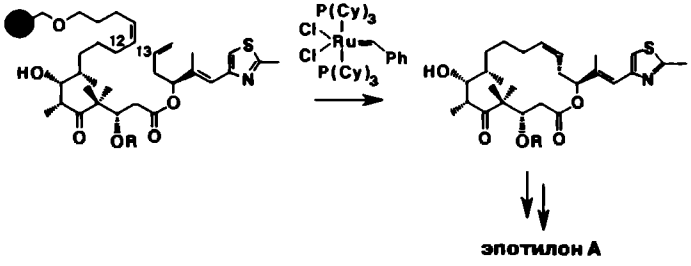


эпотилон A (R = водород)
эпотилон B (R = метил)



дискодермолид

Натуральные и синтетические вещества, подавляющие рост раковых клеток.



эпотилон A

Химический синтез эпотилона позволил бы получать различные его производные и, возможно, с еще более сильным, чем у таксола, антиканцерогенным действием.

Недавно успешно завершились активные попытки синтеза эпотилона А, проводившиеся группой исследователей под руководством К.Николау (K.C.Nicolaou; факультет химии и биохимии Калифорнийского университета, Сан-Диего, Калифорния, США). Ныне эта же группа сообщила о результатах новых экспериментов по синтезу, проведенных с использованием твердофазной подложки: получено несколько веществ, действующих подобно таксолу, в частности эпотилоны А и В.

Главная стадия синтеза эпотилона А — замыкание 16-членного цикла и отщепление твердофазной полимерной подложки. Хотя подобный процесс известен в полимерном синтезе, его большие потенциальные возможности для получения макроциклов использованы впервые.

Ключевая стадия в твердофазном синтезе эпотилона А. Процесс регулируется катализатором, в состав которого входит рутений (черный кружок — каучуковая подложка, P=трет-бутил-диметил-силил; Cy=циклогексил).

Синтез эпотилона В более традиционен, поскольку для него макроциклизация идет с образованием лактона.

Проведенная работа открывает новые возможности твердофазного синтеза природных веществ и соединений, которые прежде выделялись только из натурального сырья.

Nature. 15 May 1997. V.397. P.238—239; 268—273 (Великобритания).

Геохимия

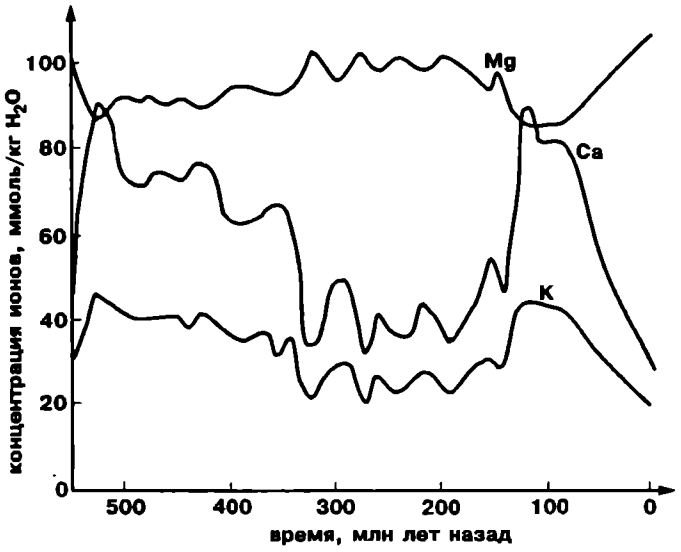
Состав морской воды непостоянен

В соответствии с существующими теориями, химический состав вод Мирового океана в продолжение геологической истории Земли менялся незначительно. Таким представлениям противоречат результаты исследований геохимика Л.Харди (L.Hardie; Университет им.Дж.Гопкинса, Балтимор, штат Мэриленд, США).

Он считает: современный состав морской воды начал формироваться всего около 24 млн лет назад, что в масштабах существования планеты срок весьма краткий. И только однажды, около 540 млн лет назад, солевой баланс вод был сходен с нынешним. В промежуточный период концентрация некоторых ионов, например кальция, менялась, превышая современную почти в три раза. К такому заключению Харди пришел на основании анализа древних известняковых пород и эвапоритов (осадков, выпадающих на дно в результате пересыщения раствора).

Коллеги встретили гипотезу с известной осторожностью. Многие согласны с тем, что содержание в известняках и эвапоритах ионов магния, кальция, калия и других элементов сильно колеблется со временем, но эти колебания, считают они, происходят уже в самих породах по мере изменения их химического состава, а не в морской воде. Например, многие известняки проходят через этап доломитизации, в ходе которой первично содержавшийся в них карбонат кальция преобразуется в кальциево-магниевый карбонат.

Автор гипотезы указывает, что химический состав



Содержание ионов магния, кальция и калия в морской воде.

в значительной мере зависит от состояния активности срединно-океанических хребтов. Важнейшим источником ионов, растворяющихся в морской воде, служат гидротермы, незначительное изменение активности которых может радикально преобразовать химический состав морских вод.

В процессе возникновения молодой земной коры в пределах срединно-океанического хребта морская вода в зонах растяжения дна просачивается в недра. При существующих там температурах и давлениях базальты подвергаются метаморфизму и превращаются в зеленые изверженные породы (диориты, диабазы и т.п.). Этот процесс сопровождается «изъятием» ионов магния из воды, а кальций и калий возвращаются обратно. Время от времени часть таких химически измененных вод снова уходит сквозь гидротермальную расселину.

Харди утверждает, что объем морских вод, участвующих в циркуляции, прямо связан с интенсивностью образования молодой земной коры. Ныне в районе срединно-океанических хребтов отмечается период необычайно низкой активности. Поэтому воды океана сейчас относительно бедны кальцием и калием, но богаты магнием. Однако в меловой период молодая кора формировалась значительно быстрее, так что циркуляция вод через растягиваемые ею участки шла очень активно. Это существенно повышало концентрацию в море кальция и калия и понижало содержание магния.

Geology. 1996. V.24. № 3. P.279 (США).

Океанология. Гидродинамика

Математика крутых волн

Зимой 1942 г. из США в Англию на борту «Куин Мэри» направлялись 15 тыс. американских солдат. Огромное судно, переоборудованное из роскошного туристического в военный транспорт, тяжело, но успешно боролось со штормом. Внезапно на него обрушилась одиночная волна невероятной высоты. Судно повалилось на борт, верхние палубы полностью залило водой. К счастью, корабль выдержал и выровнялся.

Гигантские волны, совершенно неожиданно иной раз появляющиеся среди спокойного моря, повредили и потопили немало судов. Вот и недавно, в декабре 1996 г., крупный сухогруз с экипажем 29 человек не перенес подобного удара и затонул в водах течения, огибающего южную оконечность Африки у мыса Игольный.

Поисками физических причин такого явления занялись американский математик Б.Форнберг (B.Fornberg; Университет штата Колорадо, Боулдер) и физик-гидролог Б.С.Уэйт (B.S.Whait; научно-исследовательская компания «Эксон ризерч энд инжиниринг», Аннандейл, штат Нью-Джерси). Они построили математическую модель, которая показала, что океанские течения или крупные силовые поля случайных воронок и вихревых водоворотов могут спорадически концентрировать в себе значительные массы воды даже в спокойном океане, порождая гигантскую волну. При этом течение или воронка действуют подобно огромной оптической линзе, фокусируя волновое движение волны в сравнительно узко направленный фронт.

Такие крутые волны могут возникать в акватории любого из океанов. Однако особой их частотой и размерами отличаются воды у

юго-восточного побережья Южной Африки. Именно здесь ежегодно гибнут либо получают тяжелые повреждения по нескольку супертанкеров (или других больших судов), следующих стандартным маршрутом из стран Среднего Востока в США или Европу.

Эти суда увеличивают скорость для сокращения времени, пользуясь мощным течением у мыса Игольный, идущим на юг вдоль африканского шельфа. Но гидрологические условия здесь таковы, что это течение нередко сталкивается прямо в лоб со встречной волной. Характер взаимодействия волны с течением сокращает расстояние между гребнями волн и изменяет их направление. Недавно математику М.Герберу (M.Gerber; Стелленбошский университет, ЮАР) удалось показать, что изменение в направленности волны, вызванное узким быстро движущимся потоком, может на том или ином участке течения поднять волну на весьма значительную высоту. Согласно его вычислениям, такие волны имеют совершенно определенные очертания — круто возвышающуюся фронтальную сторону с предшествующей ей глубокой впадиной, которую моряки именуют «дырой в море». По мнению Гербера, описанное событие с характерным фокусирующим эффектом как раз и наблюдается при прохождении Игольного течения. Оно весьма вероятно также в пределах Гольфстрима на севере Атлантики и вблизи него.

Заслуга Форнберга и Уэйта состоит еще в том, что они указали на принципиальную возможность подобного фокусирования и в случае, когда морскую зыбь равномерно распределенным волнением пересекают случайные флуктуации течения. Вероятность такого события, как установлено, зависит от того, насколько большое расстояние прошли волны прибоя через район, вовлеченный в воронку, а не от структуры самих воронок.

До сих пор исследования механизма образования неожиданных крутых волн были в основном теоретическими. Трудность состоит в ограниченности надежных океанографических материалов, описывающих это явление, без чего проверка математической модели почти невозможна. Тем более что такие волны наблюдаются не столь уж часто. Отказываться от маршрута, связанного с наибольшим в данном отношении риском, мореплаватели не склонны, поскольку то же попутное им Игольное течение позволяет заметно сократить путь и удешевить его. Учитывая описанную опасность для судовождения, в том числе в важнейших для морского транспорта акваториях, специалисты понимают необходимость организации изучения крутых волн на месте, что позволило бы усовершенствовать математические модели.

Science News. 1996. V.150. № 21. P.325 (США).

Климатология

Вулканы изменяют погоду

М.Келли с коллегами (M.Kelley; Отдел по изучению климата при Университете Восточной Англии, Милтон-Кейнс) провели статистический анализ хода глобальных температур за последние 120 лет и сопоставили его с данными о крупных вулканических событиях, начиная с катастрофического взрыва Кракатау (Индонезия, 1883) и до бурной активности Пинатубо на о.Лусон (Филиппинские о-ва, 1991).

Установлено, что во всех случаях, кроме одного, в течение примерно двух лет после извержения средняя температура планеты понижалась на 0.2°С относительно нормы. Исключение составляет активность вулкана Эль-Чичон (Мексика, 1982); но этот случай совпал с обратной тенденцией, которая была связана с наибольшим за все столетие потеплением, вызванным явлением Эль-Ниньо—Южная осцилляция.

Однако вулканогенные похолодания, как правило, не были повсеместными. Так, в континентальных областях высоких широт Северного полушария за извержениями следовали необычно теплые зимы. «Годом без лета» прозвали европейцы 1816 г., но почти не замеченным остался факт, что и зимы тогда тоже вроде бы не было. Вследствие вулканической активности ослаблялись сезонные метеорологические различия: лето становилось прохладным, зима — теплой.

Интересно отметить, что в Академии метеорологических наук в Пекине китайские специалисты под руководством Цзя Пэнкина разработали математическую модель глобального климата с учетом вулканизма и высказали предположение, что образующаяся завеса вулканического происхождения может послужить спусковым крючком для изменений в тепловом градиенте, усиливающим зимние струйные течения воздушных масс над полярными областями Земли. Это в свою очередь интенсифицирует западные ветры в средних широтах, особенно над Северной Атлантикой. В результате повы-

шается влияние морских факторов погоды на наземные (зимой, как известно, ветры со стороны моря способствуют сохранению тепла над сушей).

Работы английских климатологов впервые подтверждают гипотетические заключения китайских коллег на основе анализа эмпирических данных. Однако британские специалисты оговариваются, что даже столь крупные извержения, как Пинатубское, не в состоянии полностью затормозить процесс глобального потепления. В лучшем случае они замедлят его менее чем на десятилетие, обычно же вулканогенный эффект затухает в течение примерно двух лет, после чего повышение температур идет своим ходом.

International Journal of Climatology. 1996. V.16. P.537 (США).

Гляциология

Крупнейшее подледное озеро Антарктиды

К настоящему времени ученым известно 77 озер, скрытых под мощным Антарктическим оледенением. Крупнейшее из них — оз.Восток, расположенное непосредственно под одноименной российской южнополярной станцией. Оно отделено от дневной поверхности четырехкилометровым слоем льда и обнаружено лишь в результате радиозондирования, проведенного в 70-х годах.

Это отнюдь не малый географический объект: недавно с помощью принадлежащего Европейскому космическому агентству спутника «ERS-1» установлено, что площадь озера превышает 14 тыс. км^2. Сейсмическое зондирование показало, что его глубина около 125 м. Исходя из того, что озеро выдерживает гигантскую нагрузку четырехкилометрового льда, можно говорить о большой плотности воды и утверждать, что она там пресная, а не соленая морская.

По мнению английского гляциолога Г.Робина (G.Robin; Полярный исследовательский институт им.Р.Ф.Скотта при Кембриджском университете), оз.Восток образовалось около 1 млн лет назад. В этом районе, близком к Полюсу холода, нарастающее ледяное «одеяло» позволяло акватории не замерзать полностью, сохраняя сравнительно высокую температуру около −2°С. Гнет вышележащих слоев льда довел давление на поверхности воды примерно до 300—400 атм.

Участник исследований биолог С.Эллис-Эванс (C.Ellis-Evans; Британское управление антарктической съемки, Кембридж) считает, что оз.Восток, в нынешнем виде существующее по меньшей мере полмиллиона лет, может в слое донных осадков сохранять уникальные микроорганизмы.

Nature. 1996. V.381. № 6584. P.684 (Великобритания).

Метеорология

Вслед за торнадо

Метеорологи из Университета штата Оклахома (Норман, Юго-Запад США) осуществляют крупномасштабный проект «Verification of the Origin of Rotation in Tornado Experiment» («VORTEX»[1]). Участники этого эксперимента по установлению механизма вращения торнадо, занимая «стратегические» позиции в пяти соседних штатах, где торнадо — достаточно частое явление, ожидают его возникновения, с тем чтобы немедленно включиться в наблюдения.

В июне 1995 г. группа метеорологов во главе с Дж.Вурманом (J.Wurman) следовала на грузовике, оборудованном доплеровским радиолокатором, за торнадо, которое разрушило значительную часть городка Диммит в штате Техас, перебросило на значительные расстояния один из домов, несколько автомашин и даже сорвало с дорог асфальтовое покрытие. Явление продолжалось 14 мин, из них 9 мин исследователи находились не далее 4 км от «глаза бури». Глубже вступать в центральную область означало бы подвергнуться смертельной опасности.

Летом 1996 г. исследователи опубликовали обработанные ими радиолокационные изображения, впервые показавшие структуру торнадо изнутри. Они подтверждают ряд спорных теоретических предположений, касающихся динамики этого мощного явления. В частности, стала очевидной правота тех метеорологов, которые утверждали, что центральное воронкообразное облако торнадо содержит нисходящий поток воздуха. Был определен размер «глаза бури», окруженного обломками сооружений и предметами, подхваченными с поверхности земли, — его диаметр составил 200 м. Большое сходство торнадо с ураганом явилось для исследователей неожиданностью.

Выполнение проекта было продолжено летом 1996 г. с целью установить,

[1] Эта аббревиатура складывается в слово, означающее вихрь, воронку.

насколько наблюдавшиеся процессы вообще типичны для торнадо.

Science. 1996. V.272. № 5269. P.1774 (США).

География

Станция ЮАР в Антарктиде

Более 35 лет геофизики Южно-Африканской Республики ежегодно зимуют в Антарктиде, на своей полярной станции «SANAE» (аббревиатура от «South-Africa National Antarctic Expedition» — «Южно-Африканская национальная антарктическая экспедиция»), и эта станция давно заняла достойное место среди других работающих здесь экспедиций по международным программам изучения Земли.

База «SANAE» была построена на шельфовом леднике у самого побережья Индийского океана, где осадки очень обильны. Под слоем снега, ежегодно превышающим 1 м, обрушивалась самая прочная кровля.

В течение последних зим исследователи в очередной раз оказались под глубоким снегом, так что жить и работать там стало невозможно. Африканцы решили перенести свою базу в глубь континента, на 200 км к югу. Здесь, на краю высокого скалистого утеса, в 1996 г. было закончено сооружение «SANAE-IV». Метеорологи определили местную «розу ветров» и убедились: превалирующее направление и сила ветров таковы, что снег почти не будет задерживаться, а отложившийся станет таять во время южнополярного лета.

Все дома стоят на «курьих ножках»: воздушные потоки продувают их снизу, не давая возможности образоваться застругам — снежным барханам, обычно собирающимся на подветренной стороне любого полярного сооружения (кстати, это русское слово давно стало международным и на любом из европейских языков так и пишется — «sastrugi»).

С марта 1997 г. на «SANAE-IV» возобновятся метеорологические, климатологические, сейсмологические, гляциологические исследования; специалисты хотят изучить особенности распространения радиосигналов низкой частоты, пробегающих из Северного полушария (с полярной станции в Гренландии) в Южное и обратно.

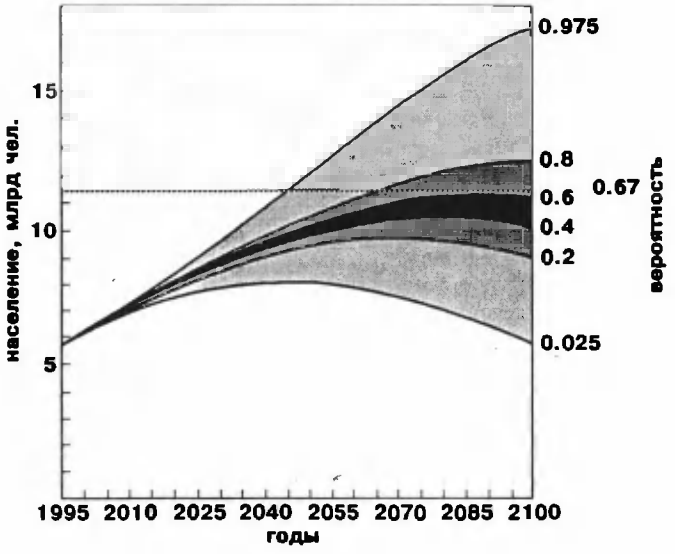
New Scientist. 1996. V.150. № 2035. P.11 (Великобритания).

Демография

Народонаселение: новые прогнозы

Опубликованы уточненные результаты длительных демографических исследований, проведенных группой специалистов под руководством В.Лутца (W.Lutz; Международный институт прикладного системного анализа, Лаксенбург, Вена, Австрия).

Главный вывод этого 400-страничного документа: численность народонаселения Земли, составляющая ныне около 5.8 млрд чел., вряд ли когда-либо удвоится[1]. Примерно к 2080 г. она достигнет максимума — около 10.6 млрд чел., после чего пойдет на спад и к концу XXI в. приблизится к 10.35 млрд, продолжая медленно снижаться.



[1] См. также: Рост народонаселения сокращается // Природа. 1996. № 9. С.122.

Возможная численность народонаселения мира в XXI в.: с вероятностью 95% эта величина может достигнуть значений, лежащих в светлоокрашенной области, с вероятностью 60% — в более темной области, с вероятностью 20% — внутри самой темной области. Прямая указывает уровень, соответствующий удвоению современной численности человечества.

Ошибка ранее делавшихся по заказу ООН прогнозов изменений прироста населения (три варианта) состояла в том, что расчеты производились лишь на основании предполагавшихся колебаний рождаемости. Рассматривалась низкая, средняя и высокая рождаемость, однако вероятность развития человечества по каждому из этих трех сценариев не указывалась. Весьма малое внимание уделялось таким факторам, как влияние массовых миграций населения на рождаемость и смертность, а также грядущие изменения в уровнях общей смертности. В новой оценке эти переменные учтены. Кроме того, теперь к работе были привлечены независимые эксперты — демографы, статистики, специалисты по рождаемости и миграционным процессам. Они разработали 2 тыс. сценариев(!) и оценили их вероятность. Сценарий, поддержанный 67% специалистов, изложен выше.

Удвоение численности населения, которое предсказывали прежние прогнозы, предвещало в недалеком будущем голод, войны и эпидемии. Ныне это считается маловероятным, однако среди предложенных сценариев есть и «крайние», предполагающие весьма серьезные изменения. Так, согласно одному из вариантов, к 2100 г. народонаселение достигнет 23 млрд, что стало бы катастрофой для вида Homo sapiens. На конце иного спектра мнений — прогноз, по которому эпидемии и спад рождаемости низведут род человеческий всего до 4 млрд, что было бы трагедией для современной цивилизации. По мнению Лутца, вероятность обоих предположений не превышает 1%. «Идеальным» он называет тот сценарий, по какому к 2100 г. человечество составит примерно 6.5 млрд. Это соответствует низкому уровню и рождаемости, и смертности, причем никаких принудительных мер к сокращению размеров семьи принимать не придется, а качество жизни сохранится на достойном уровне. Вероятность такого прогноза оценивается в 60%.

Серьезные проблемы во всем мире вызовет к 2100 г. общее старение населения: по мнению большинства экспертов, численность людей, чей возраст превысит 60 лет, поднимется с 9.5 до 18% — по одним оценкам, или до 40% (!) — по другим, а численность тех, кому еще не исполнится 14 лет (ныне их около 30%), снизится до 10—23% всей популяции.

Итак, по оценкам специалистов, «безоблачное» будущее нас не ожидает, но и «конец света» от тесноты и скученности, по-видимому, не угрожает.

New Scientist. 1996. V.151. № 2050. P.8; Nature. 1997. V.387. P.803 (Великобритания).

Над номером работали
Ответственный секретарь
Ю.К.ДЖИКАЕВ

Научные редакторы
И.Н.АРУТЮНЯН
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Ж.Г.ВАСИЛЕНКО
М.Ю.ЗУБРЕВА
Г.В.КОРОТКЕВИЧ
Л.А.ПАРШИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА

Литературный редактор
М.Я.ФИЛЬШТЕЙН

Художественные редакторы
Л.М.БОЯРСКАЯ, Э.Р.БОЯРСКАЯ,
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Е.Е.БУШУЕВА

Компьютерный набор
Е.Е.ЖУКОВА

Перевод
П.А.ХОМЯКОВ

Корректоры
В.В. БЕЛЯЕВ
Р.С.ШАЙМАРДАНОВА

В художественном оформлении номера принимали участие
М.В.ИВАНОВСКИЙ

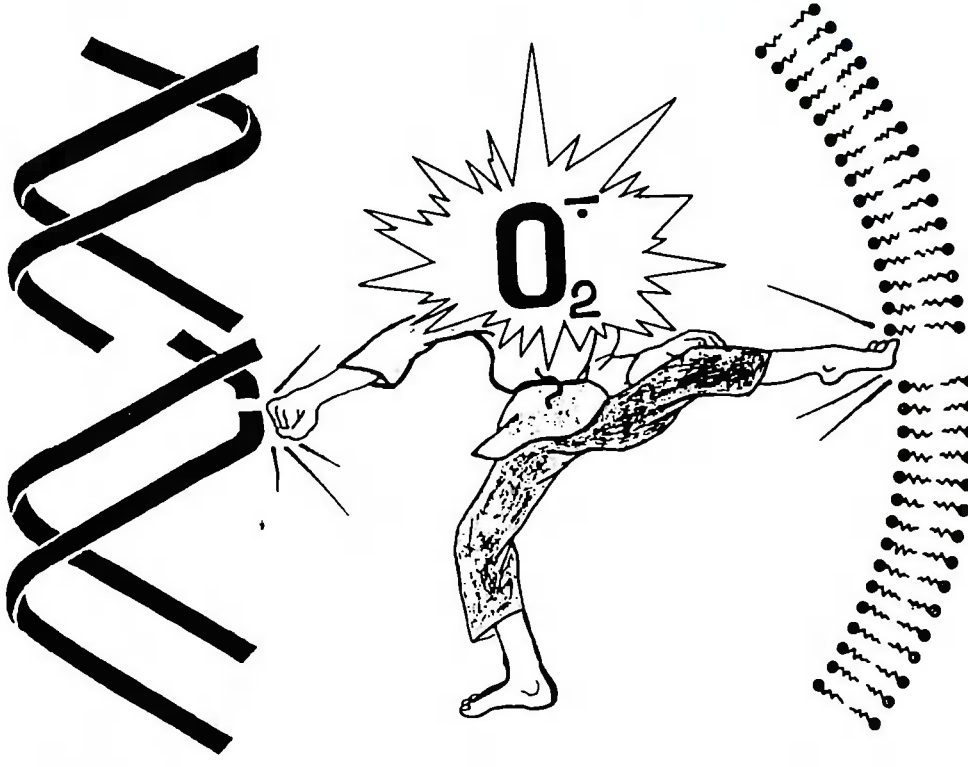
Издательство «Наука» РАН

Адрес редакции:
117810, Москва, ГСП-1
Мароновский пер., 26
Тел.: 238-24-56, 238-23-33
Факс: (095) 238-26-33
Справки:
\http:\\www.ripn.net\infomag

Подписано в печать 30.09.97.
Бумага типографская № 1
Офсетная печать
Усл. печ. л. 10,32
Усл. кр.-отт. 67,8 тыс.
Уч.-изд. л. 15,1
Заказ 1631

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат Комитета Российской Федерации по печати
142300, г. Чехов Московской области
Тел.: (272) 71-336
Факс: (272) 62-536

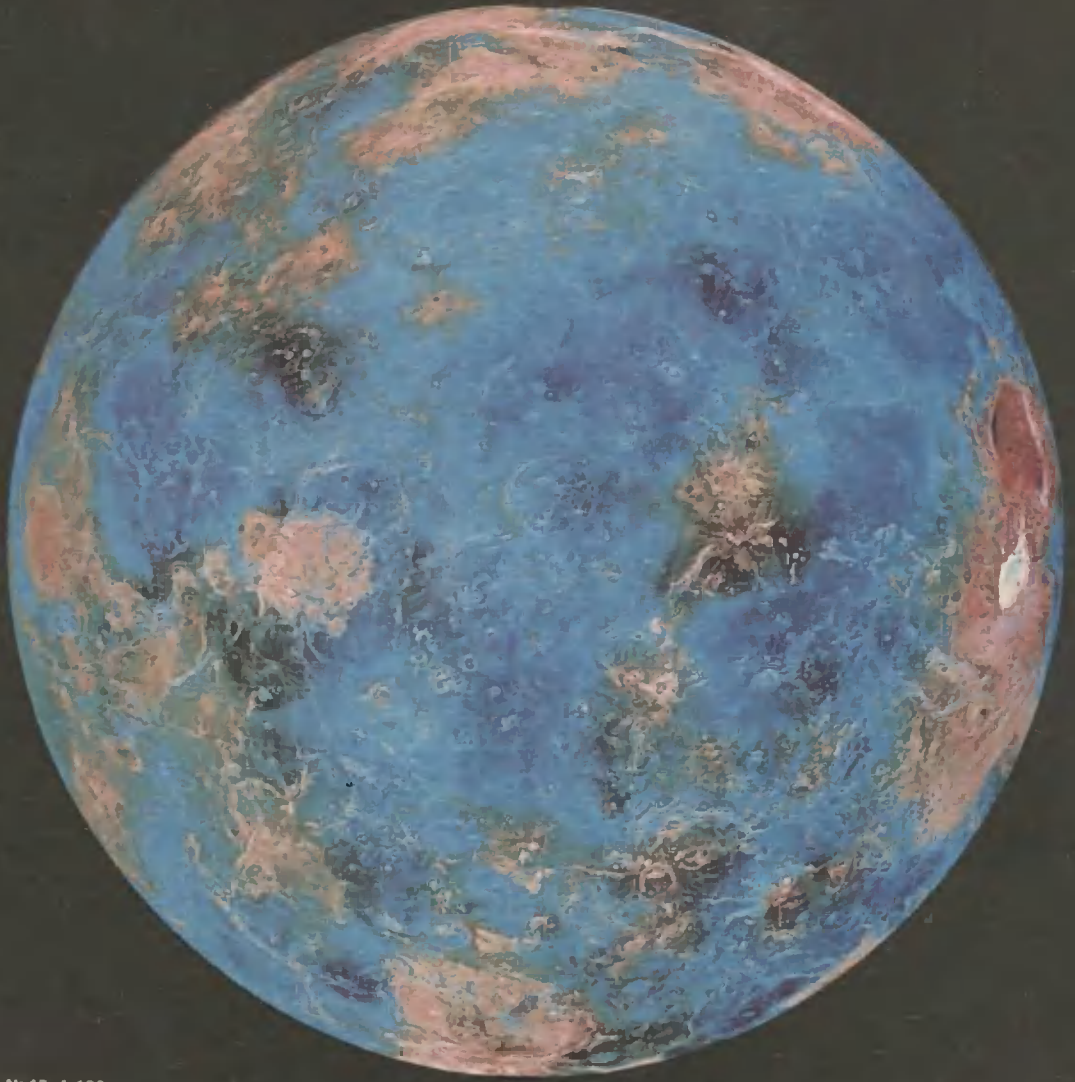
ПРИРОДА
11 97



ДНК **мембрана**

Почти все живые организмы нуждаются в кислороде для биологического окисления питательных веществ. Но он же может стать причиной образования в клетке очень вредных для нее свободных радикалов и перекиси водорода. Именно они повреждают клеточную мембрану и ДНК. Чтобы обезопасить клетку от этого зла, природа придумала целую цепь ухищрений — от уменьшения специальными способами концентрации кислорода до самоуничтожения клетки.

В. П. Скулачев. КИСЛОРОД В ЖИВОЙ КЛЕТКЕ: ДОБРО И ЗЛО



ISSN 0032 - 874X. Природа. 1997. №10. 1-128

Индекс 70707