

ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

7-97



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), доктор географических наук 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), член-корреспондент РАН 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), доктор биологических наук М.А.ФЕДОНКИН (палеонтология), доктор биологических наук С.Э.ШНОЛЬ (биология, биофизика), О.И.ШУТОВА (редактор отдела охраны природы), доктор физико-математических наук А.М.ЧЕРЕПАЩУК (астрономия, астрофизика).

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Лошадь Пржевальского. См. в номере: **Паклина Н.В.**  
*По следам исчезнувших тахи.*

Фото Н.Н.Спасской

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Ход полипептидной цепи молекулы рибонуклеазы Vi. Полипептидная цепь схематически изображена в виде ленты. См. в номере: **Мелик-Адамян В.Р., Арутюнян Э.Г., Поляков К.М.** *Пространственная структура белков.*

## В НОМЕРЕ

- 3 Несветов А.М.**  
**ЗАМЕТКИ О РАКЕ**  
Морфологические и иммуноморфологические аспекты

*Детальное изучение морфологической картины новообразования позволило выделить три основных типа рака: агрессивный, стабильный и регрессивный.*

- 16 Ушатинская Г.Т., Герасименко Л.М.**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО МИНЕРАЛЬНОГО СКЕЛЕТА ДРЕВНЕЙШИМИ ОРГАНИЗМАМИ**

*На границе протерозоя и кембрия (530–540 млн лет назад) произошло одно из интереснейших событий в истории органического мира: многие организмы почти одновременно приобрели способность строить минеральный скелет. Чем же было обусловлено столь грандиозное явление, определившее всю дальнейшую эволюцию жизни на Земле?*

- 23 Колясников Ю.А.**  
**ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЕРМСКИХ «РЯБЧИКОВ» СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

- 26 Малахов В.В., Адрианов А.В.**  
**ГИГАНТСКАЯ ПРИАПУЛИДА ИЗ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА**

- 27 Василенко Ж.Г., Сурдин В.Г.**  
**КЛЮЧ К МЕЖЗВЕЗДНОЙ ХИМИИ НАЙДЕН**

- 31 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СЕГОДНЯ**  
**ПАМЯТИ АКАДЕМИКА Б.К.ВАЙНШТЕЙНА**

*Борис Константинович Вайнштейн был одним из тех, чьи труды определили современное состояние структурного анализа. Так, он фактически создал электронографию как метод изучения структуры тонких пленок, заложил фундамент для работ по выяснению строения жидких кристаллов, организовал в нашей стране исследования структуры биологических макромолекул. Многочисленные ученики академика Вайнштейна успешно развивают инициированные им научные направления, устанавливая, как устроены различные объекты живой и неживой природы.*

- Ключковская В.В.**  
**ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ КАК МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ (32)**

- Симонов В.И.**  
**В ПОИСКАХ СВЯЗЕЙ СТРУКТУРА—СВОЙСТВА (41)**

- Островский Б.И.**  
**РАЗНООБРАЗИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ (50)**

- Мелик-Адамян В.Р., Арутюнян Э.Г., Поляков К.М.**  
**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА БЕЛКОВ (61)**

- Свергун Д.И., Фейгин Л.А.**  
**МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ: ВЗГЛЯД НА СТРОЕНИЕ НАТИВНЫХ БИОПОЛИМЕРОВ (70)**

- 80 ОЧЕРКИ НАТУРАЛИСТА**  
**Новиков Б.В.**  
**ГОД С РОСОМАХАМИ**

*Воспитание детенышей диких животных — дело очень хлопотное, но и очень увлекательное. Сколько же открывается нюансов в поведении молодых зверей, когда наблюдать за ними день за днем!*

- 91 Пеклина Н.В.**  
**ПО СЛЕДАМ ИСЧЕЗНУВШИХ ТАХИ**

*Лошадь Пржевальского, тахи (монг.), — единственный дикий вид настоящих лошадей, но и она сохранилась только в зоопарках.*

- 102 Абрамова З.А., Григорьева Г.В.**  
**ЮДИНОВО — ПОСЕЛЕНИЕ ОХОТНИКОВ НА МАМОНТА**

- 104 НОВОСТИ НАУКИ (79)**  
**КОРОТКО (103)**

- 123 РЕЦЕНЗИИ**  
**Карлов Н.В.**  
**«ЗОЛОТАЯ КНИГА», ИЛИ «ПЕЧАЛЬ МОЯ СВЕТЛА» (ВМЕСТО РЕЦЕНЗИИ)**

- 125 ВСТРЕЧИ С ЗАБЫТЫМ**  
**Волков В.А.**  
**ПЕРЕМЕНЧИВАЯ СУДЬБА ЗИГМУНДА ВРУБЛЕВСКОГО**

## CONTENTS

- 3 Nesvetov A.M.**  
NOTES ON CANCER: MORPHOLOGICAL AND IMMUNOMORPHOLOGICAL ASPECTS

*Detailed research on the morphological pattern of neoplasm growth reveals three major types of cancer: aggressive, stable, and regressive.*

- 16 Ushatinskaya G.T. and Gerasimenko L.M.**  
HOW ANCIENT ORGANISMS LEARNED TO BUILD THEIR MINERAL SKELETONS

*The Proterozoic-Cambrian boundary (530–540 Ma) was marked by a very interesting event in the history of the organic world: many organisms almost simultaneously acquired an ability to build a mineral skeleton. What was the cause of this highly extraordinary phenomenon, which would determine the entire further evolution on earth?*

- 23 Kolyasnikov Yu.A.**  
ORIGIN OF PERMIAN SPOTED SEDIMENTS IN NORTHEASTERN RUSSIA

- 26 Malakhov V.V. and Adrianov A.V.**  
GIANT PRIAPULIDA FROM THE ARCTIC OCEAN

- 27 Vasilenko Zh.G. and Surdin V.G.**  
THE KEY TO INTERSTELLAR CHEMISTRY DISCOVERED

- 31 STRUCTURE ANALYSIS TODAY**  
IN MEMORY OF ACADEMICIAN B.K. VAINSHTEIN

*Boris Konstantinovich Vainshstein was one of those who have shaped the state of the art of crystal structure analysis. In particular, he was the driving force in the development of electron diffraction as a tool for investigating thin films, laid the foundation for elucidating the structure of liquid crystals, and pioneered structural studies on biological macromolecules in our country. His numerous students successfully carry on the lines of research that he initiated, uncovering the internal features of both living and dead materials.*

- Klechkovskaya V.V.**  
ELECTRON DIFFRACTION AS A METHOD OF STRUCTURE DETERMINATION (32)

- Simonov V.I.**  
IN SEARCH OF RELATIONSHIPS BETWEEN STRUCTURE AND PROPERTIES (41)

- Ostrovsky B.I.**  
DIVERSITY OF LIQUID CRYSTALS (50)

- Melik-Adamyan V.R., Harutyunyan E.H., and Polyakov K.M.**  
THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF PROTEINS (61)

- Svergun D.I. and Felgin L.A.**  
SMALL ANGLE SCATTERING: A WINDOW ON THE STRUCTURE OF NATIVE BIOPOLYMERS (70)

- 80** ESSAYS ON WILDLIFE

- Novikov B.V.**  
A YEAR WITH WOLVERINES

*Rearing the young of wild animals is a business that is troublesome but extremely fascinating. Just think of all the nuances in the behavior of young animals one discovers when observing them day after day!*

- 91 Paklina N.V.**  
ON THE TRACKS OF THE TAKHI THAT VANISHED

*Przewalski's horse (Mongolian TAKHI) is the last surviving representative of the wild true horse, but it is not known to exist outside zoos.*

- 102 Abramova Z.A. and Grigoryeva G.V.**  
YUDINOVO: A SETTLEMENT OF MAMMOTH-HUNTERS

- 104** SCIENCE NEWS (79)

IN BRIEF (103)

- 123** BOOK REVIEWS  
**Karlov N.V.**  
«GOLDEN BOOK» OR «SADNESS IN THE SWEET» (IN LIEU OF A REVIEW)

- 125** ENCOUNTERS WITH THE FORGOTTEN  
**Volkov V.A.**  
CHANGING FORTUNES OF SIGMUND VRUBLEVSKY

# Заметки о раке

## Морфологические и иммуноморфологические аспекты

А. М. Несветов

*О том, что узнал, поведай всем.  
А. Фирдуоси*



*Александр Михайлович Несветов, кандидат медицинских наук, доцент, онколог-гистолог Московского городского онкологического диспансера. Основные работы связаны с морфологической характеристикой и диагностикой различных заболеваний, в том числе и онкологических.*

**Р**АК — болезнь вездесущая и очень древняя. Опухоль находили еще у ископаемых ящеров, а медики, отмечавшие сходство между внешним видом опухоли и речным раком или морским крабом, пробовали лечить больных в добиблейские времена.

В настоящее время рак в «табеле о рангах убийц» человечества прочно занимает 2-е место. Кажется, о нем все должно быть известно доподлинно, но это не так. Кроме трудностей своевременной диагностики и эффективности лечения, есть и другие: до сих пор не понятно основное — биологическая суть заболевания, не ясен субъект, с которым, собственно, и ведется столь беспощадная и чрезвычайно дорогостоящая война.

Ни в коей мере не претендуя на разгадку природы новообразования, хочу поделиться тем, что увидел и что пришлось узнать, исследуя десятилетиями морфологию злокачественных опухолей. Общее количество изученных «объектов» сегодня уже невозможно сосчитать — их многие тысячи.

OMNIS CELLULA E CELLULAE\*

Живой организм состоит из клеток (иногда — из одной), которые имеют все необходимое, во-первых, для точного воспроизводства и, во-вторых, для выполнения различных функций. Клетка поддерживает постоянство внутриклеточной среды, дышит, вырабатывает энергию, поставляет строительный материал и различные жизненно необходимые для себя и для

© А.М.Несветов

\* Каждая клетка из клетки (Р. Вирхов).

всего организма химические вещества (ферменты, гормоны, продукты внешней секреции); она сокращается (мышечная клетка), выполняет функцию коммуникации, анализа и хранения информации и т.д.

Вновь появившаяся в результате деления клетка-«младенец» не способна к «профессиональной деятельности», она должна созреть до рабочего состояния, т.е. дифференцироваться. Наоборот, «пожилая», узко специализированная клетка-«профессионал» уже не делится. Размножающаяся «молодежь» в определенный момент, как будто по чьей-то команде, прекращает делиться и начинает дифференцироваться. При этом соотношение незрелых делящихся и зрелых рабочих клеток жестко регулируется организмом, также как и общее их количество в органе и ткани. Сверхзадача регуляции: ни одной лишней клетки!

Однако в жизни организма наступает время (чаще — в конце жизни), когда что-то в механизме ломается. Молодые клетки перестают дифференцироваться или останавливаются на полпути. Эти «вечно молодые существа», ничего, или почти ничего не умея делать, продолжают активно размножаться. В результате появляется огромное количество клеток, незадействованных в работе, со сниженной способностью (или вовсе потерявших способность) контактировать с себе подобными и образовывать функционирующую ткань. Дело в том, что нормальная клетка стремится к себе подобной, она вступает с ней в прочную связь. При этом прекращается как движение клетки, так (что особенно важно) и ее деление (контактное торможение движения). Остановившиеся клетки складываются в упорядоченную массу, начинают созревать и функционировать, т.е. формируют ткань.

**ЗЛОКАЧЕСТВЕННАЯ ОПУХОЛЬ, ИЛИ «ЖИВЕЕ ВСЕХ ЖИВЫХ»**

Совсем не так ведет себя клеточная «золотая молодежь», потерявшая

способность образовывать ткань. Клетки эти, сталкиваясь друг с другом, не останавливаются (или останавливаются лишь на короткое время), лихо продолжая движение и деление. Контактному торможению мешает высокий отрицательный заряд на их оболочке, ведущий к взаимному отталкиванию. Подвижность и незакрепленность таких клеток, их асоциальное поведение становятся причиной агрессии.

Постоянно размножающиеся, не вполне созревшие, не способные к прочной консолидации и целесообразной для организма работе, активные и подвижные клетки медики называют опухолевыми, а образованную ими ткань — злокачественной опухолью.

Трансформироваться в опухоль может любая ткань, но чаще та, клетки которой имеют короткий жизненный цикл и вынуждены интенсивнее делиться. Поломка в системе «деление—созревание» в такой ткани происходит значительно проще.

Яркий пример короткоживущей ткани — эпителий. Он выстилает организм снаружи и изнутри, строит железистые органы, клетки которых в процессе жизнедеятельности вынуждены «жертвовать собой за общее дело». Злокачественная опухоль из эпителия встречается поэтому чаще многих других. Она называется раком. Дальнейший рассказ о нем.

#### АГРЕССИЯ, ИЛИ НАШЕСТВИЕ

Рассматривая под микроскопом раковую ткань, в голову приходят вовсе не медицинские сравнения. Мелкие группки опухолевых клеток отрываются от основного скопления и протискиваются в щели родительской ткани. Они пролезают в узкие пространства вокруг кровеносных и лимфатических сосудов, нервных стволов и других коммуникаций, раздвигают волокна соединительной ткани, растворяют (лизуют) окружающую строму, занимая все новые и новые территории, инфильтрируя или оттесняя нормальную ткань. Как заправские террористы, раковые клетки захватывают

транспортные пути (кровеносные и лимфатические сосуды), региональные «отделы внутренних дел» (местные лимфоузлы) и беспрепятственно распространяются по всему организму, достигая самых удаленных его уголков, т.е. метастазируют.

Есть и другой способ присоединения новых территорий. Вблизи основной дислокации раковых «дивизий» в опухолевые клетки трансформируются внешне вполне нормальные элементы материнской ткани. На нейтральном пространстве возникают очаги ракового «мятежа»: они разрастаются, сливаются друг с другом и с основным массивом опухоли (аппозиционный рост опухоли). Та часть органа, где разворачиваются описанные события, называется раковым полем, но о нем — позже.

Цель этой самоубийственной агрессии — одна: обеспечить питанием все раковое «воинство». Причем конца этому процессу нет, так как «воинство» растет без перерыва и требует все больше из «бюджета» организма. Таким образом, злокачественная опухоль ведет против своей же «Родины» захватническую войну, которая чаще всего заканчивается гибелью как родного организма, так и, естественно, самой опухоли.

Следует напомнить, что рак возникает «в гуще народа», из обычных клеток, которые вдруг оказываются неспособными к нормальной работе. Их существование сводится к одному — размножению. В результате в органе появляется огромное количество «праздношатающихся», «не пристроенных к делу» элементов, занимающихся исключительно «разбоем и любовью». Эти элементы — субстрат и носители агрессии по отношению к собственной ткани, к собственному организму. К агрессии приводит потеря контроля организма за клеточным воспроизводством, ведущей к «демографическому взрыву» на клеточном уровне.

Вот здесь и возникают ассоциации с явлениями другого порядка и другого уровня. Массовое переселение на огромные расстояния насекомых,

земноводных и млекопитающих, а также великие переселения народов, не один раз перекраивающие этническую карту планеты Земля. Видимо, агрессивность — явление общебиологического порядка и касается процессов, идущих на разных уровнях от биосообществ до отдельных их отрядов. Она использует похожие приемы и порождается схожими причинами, суть которых — нарушение равновесия между воспроизводством, востребованностью его и наличием ресурсов для существования.

#### ЗАЩИТА — ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Мнение о том, что раковая агрессия не встречает в организме сопротивления, — ошибочно. Более ста лет назад гистолог Пауль Эрлих обратил внимание на инфильтрацию опухолевой ткани лейкоцитами<sup>1</sup>. Постепенно у онкологов сложилось впечатление: чем интенсивнее инфильтрация опухоли лимфоцитами, тем медленнее ее рост. Такая инфильтрация — зримое (под микроскопом) проявление войны «сил безопасности» организма с новообразованием. Причем тактику и стиль этой войны можно передать теми же словами и в тех же терминах, что и боевые действия в обществе человеческом.

Напомним некоторые общие сведения о противоопухолевой защите<sup>2</sup>. Любое новообразование обладает антигенными свойствами, т.е. воспринимается организмом как чужое, а следовательно, вызывает защитную реакцию, направленную на уничтожение «чужака» — носителя антигена. Подобная реакция обеспечивает организму необходимую стабильность, т.е. морфологическое и функциональное постоянство — гомеостаз, а в конце концов — длительность существования.

<sup>1</sup> Бережная Н.М. // Эксперим. онкология. 1994. Т.16. № 4—6. С.253—269.

<sup>2</sup> Поликар А., Бесси М. Элементы патологии клетки. М., 1970; Зюсс Р., Канцель В., Скрибнер Дж. Рак: эксперименты и гипотезы. М., 1977; Карр Я. Макрофаги. М., 1978.

Клетки иммунной системы постоянно «инспектируют» клеточную массу организма. В состав такого «патруля» входит пара из лимфоцита и макрофага. При микрокинсьемке видно, как лимфоцит словно обнюхивает поверхность каждой клетки, считывая информацию об антигенном ее составе. Антигенные отклонения, т.е. начало превращения клетки в опухолевую, немедленно выявляются, и такой «диссидент» уничтожается макрофагом. Считанная лимфоцитом информация о мутанте передается также в местные иммунные органы (лимфатические тканевые скопления, регионарные лимфоузлы) и там записывается специальными лимфоцитами на своем информационном ДНК-аппарате.

Так работает иммунная система в молодом здоровом организме (объектом ее деятельности, естественно, является также любая инфекция и трансплантат). Тут силы защиты преобладают над «криминальными элементами». Идут годы, и защита слабеет — «внутренняя разведка» постепенно теряет «бдительность». Появившиеся опухолевые клетки все чаще «ускользают» от лимфоцитарного надзора. Опухоль начинает расти, и, хотя рано или поздно она обнаруживается (чем старше организм, тем позже), — время упущено. Разрушить большую раковую ткань организму чаще всего не под силу. Важно было не допустить ее появления, задуть ее в самом зародыше.

Какова же причина сбоя в программе противоопухолевой защиты, происходящая в основном у пожилых? На этот счет существуют лишь версии. Одна из них — возрастная инволюция вилочковой железы и других органов, ответственных за иммунитет. Из экспериментов известно, что удаление вилочковой железы у новорожденного ликвидирует иммунную реакцию у взрослого<sup>3</sup>. У пожилых людей эта железа почти полностью замещается жировой клетчаткой. Следовательно,

на склоне лет человек лишается основного источника иммунных процессов.

Другой механизм, позволяющий раковой клетке избежать столкновения с лимфоцитом-«разведчиком» и лимфоцитом-киллером, — высокий отрицательный заряд на ее мембране, отталкивающий от себя также отрицательно заряженный лимфоцит. Любопытно, что в молодом организме преодолеть это сопротивление лимфоциту все же удается.

Наконец, подавление нормальных защитных реакций, позволяющее родиться раку, связывают с накоплением в организме различных химических и вирусных канцерогенов.

## МОРФОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ

### Участники

Морфологическая картина местных тканевых защитных реакций организма на рак привлекла наше внимание своим динамизмом еще много лет назад<sup>4</sup>. Большое количество наблюдений как бы оживили статичную картину, видимую под микроскопом. Действующие лица (клетки) зашевелились, все пришло в движение, а события, связанные с раковым нашествием, приобрели драматургию. Попробуем разобраться в этих событиях и в их участниках, сражающихся друг с другом.

Раковые клетки — это, конечно, враг. Они лезут во все щели захватываемой ткани и расплавляют ее. Их движение сопровождается непрерывным делением, а, значит, и неуклонным увеличением клеточной массы. Однако на пути продвижения раковых отрядов встают клетки иммунной системы, своеобразная «армия спасения». Разные по функции и по морфологии (лимфоциты, макрофаги, плазматиты, эозинофильные и нейтрофильные гранулоцитарные лейкоциты, тучные и

<sup>3</sup> Карр Я. Механизмы биологической защиты. М., 1976.

<sup>4</sup> Несветов А.М., Жданов А.С. // *Вопр. онкологии*. 1981. № 7. С.25—31; Несветов А.М. Морфологическая диагностика раннего рака желудка. М., 1982.



гигантские клетки инородных тел, фибробласты), все они, согласно своим генетическим возможностям, «отбиваются от наступающего неприятеля».

Макрофаг уничтожает чужеродный для организма антигенный материал, прежде всего — раковые клетки. Он «откусывает» и фагоцитирует (заглатывает) генетический аппарат клетки-мутанта, лизирует его или всю клетку. Гигантские клетки инородных тел — производное тех же макрофагов. Они появляются в ткани, когда объект их нападения слишком велик для макрофага-одиночки. У семейства лимфоцитов много «профессий». Среди них — хранители генетической памяти, в ядрах которых содержится информация об антигенном составе собственного организма и обо всех чужих антигенах (белках или полисахаридах), встреченных на протяжении жизни. Лимфоцит обязан передать информацию о новом или старом чужаке-антигене другим клеткам-исполнителям (эффекторам) иммунного аппарата. Лимфоцит — киллер, один из «команды судебных исполнителей».

Плазматическая клетка — из того же семейства. Эта одноклеточная лаборатория синтезирует специфические антитела (иммунноглобулины) против любого обнаруженного лимфоцитом антигена (бактериального, опухолевого, трансплантационного). Иммуноглобулин плазмацита поступает в кровь, находит и дезактивирует «врага», делая его легкой добычей макрофага. Таким образом, антигенную неприкосновенность и стабильность организма обеспечивают: разведка, контроль, молниеносная и совершенная коммуникация, быстрая мобилизация клеточных ресурсов с их срочным обучением и специализацией. На такую операцию организм затрачивает 4—5 дней.

Опухолевую ткань инфильтруют еще четыре класса клеток, хорошо известных каждому биологу по банальному воспалению.

Нейтрофильный гранулоцитарный лейкоцит — клетка-«дворник». Ее можно сравнить со спецназовцем из отряда быстрого реагирования, так как

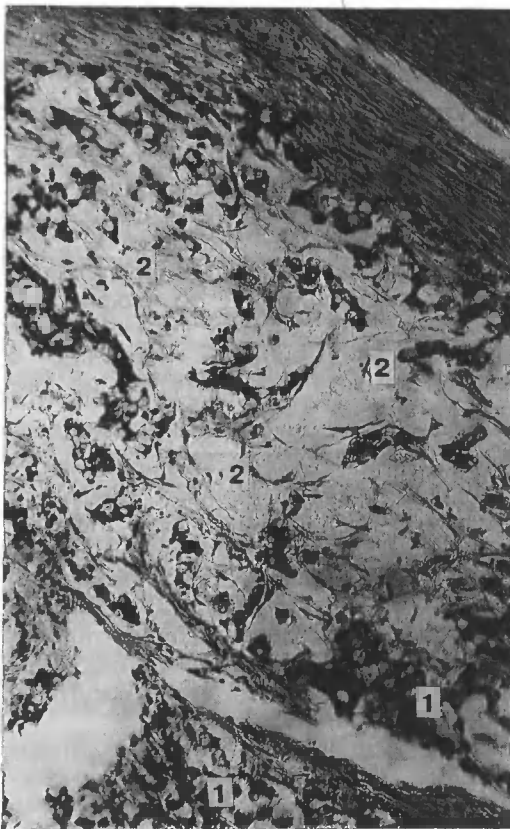
она появляется в «очаге конфликта» уже в течение часа после его зарождения. Нейтрофильный гранулоцит содержит в своих гранулах протеолитические ферменты, способные разрушить любую бактериальную, клеточную и тканевую структуру. Он «забрасывает противника» этими ферментами, нередко погибая и сам (скопление погибших нейтрофилов — всем известный гной). Эозинофильный гранулоцит — также обязательный участник всех событий, связанных с обороной, хотя его функция до сих пор не вполне ясна.

Тучные клетки и их близкий родственник базофильный гранулоцит содержат в своих гранулах гепарин и гистамин, конструируя при помощи этих биологически активных веществ картину острого воспаления, отражающую ускоренную доставку в очаг «военных действий» дополнительной энергии и ресурсов, а также форсированную эвакуацию из него продуктов распада (резорбцию).

Фибробласт выполняет «ремонтные работы», занимаясь «починкой» поврежденной в ходе «боевых действий» ткани. Он же формирует строму раковой опухоли, окружает ее капсулой (крепостной стеной), замедляя тем самым ее рост. В результате работы фибробластов в очаге закончившегося «конфликта» появляются соединительно-тканые «заплаты» в виде рубчиков и рубцов.

Итак, на территории, занятой опухолью, идет настоящая война. Картина чрезвычайно пестрая. Линия фронта (инвазии) причудливо извивается. Видно как лимфо-макрофагальный-гранулоцитарный инфильтрат отсекает небольшие фрагменты опухолевой ткани, окружает их, разбивает на еще более мелкие осколки и расплавляет (лизирует) их. Подобное наблюдается чаще в полосе соприкосновения опухолевых клеток и нормальной ткани, но может быть и в глубине ракового узла.

В других же участках раковые клетки внедряются в орган в виде языков и тяжей, они расплавляют его ткани, проникают в лимфатические щели и кровеносные сосуды, завоевы-



*Фрагмент раковой ткани. Слизистый (регрессивный) рак: 1 — опухолевые клетки, 2 — слизистые полости. Здесь и на всех последующих микрофотографиях препараты окрашены гематоксилином-эозином. Увел. 80.*



*Фрагмент опухоли рака желудка. Темное овальное образование — гранула инородных тел, в центре которой видны светлые мелкие комплексы погибающих раковых клеток. Увел. 80.*

вая все новые территории. Мелкие опухолевые комплексы, как лазутчики, проникают очень глубоко, попадая вместе с лимфой в регионарные лимфоузлы. В них они уничтожаются, но это происходит далеко не всегда.

#### **Регрессия**

В центральных, но особенно в периферических, отделах (в зоне инвазии) опухолевого узла можно видеть такую картину: раковые клетки бледнеют, теряют ядерное вещество, напоминают тени. Они окружены и инфильтрованы нейтрофильными гранулоцитами, частично распавшимися и напоминающими микрофокус гнойного воспаления. В инфильтрате из макрофагов, лимфо-

цитов, плазмацитов и гранулоцитов разбросаны мертвые раковые клетки и их осколки. В других случаях опухолевые клетки трансформируются в безъядерные слизистые шарики, плавающие в полостях, заполненных такой же слизью. Слизистые клетки окружены, как правило, плазмацитами, макрофагами и эозинофилами (слизистый рак).

Такие очаги распада или ослизнения опухоли носят обычно локальный характер и не сопровождаются ее полной гибелью. Однако бывает (к сожалению, очень редко), что распадается практически вся раковая ткань. На ее месте среди мелких групп мертвых клеток, их осколков и слизи-

тых масс «толпятся» клетки иммунной системы, разбросаны гранулемы и гигантские клетки инородных тел, видны скопления ксантомных клеток и сидерофагов среди разросшейся соединительной ткани и грубых рубцов.

При этом микроскопическая картина разрушенного иммунной системой рака поразительно напоминает опухоль после эффективного облучения или химиотерапии. В таких случаях говорят о самоизлечении, о регрессии рака.

За все время работы с онкологическим материалом мы наблюдали подобное всего в нескольких десятках случаев из многих тысяч (приблизительно 0.25—0.3%). Причем саморазрушению подвергались раки разных органов: желудка, толстой и прямой кишки, легкого, молочной и щитовидной желез, кожи и т.д. Регрессия (гибель) фрагментов или всей опухоли — зримый результат иммунной атаки против рака. Однако чаще бывает по-другому.

#### **Дифференцированный рак**

Под объективом микроскопа, в тыловых и центральных участках опухолевого узла, раковые клетки, замедляя свое деление и движение вперед, начинают организовываться. Они складываются в структуру, напоминающую исходную ткань: железы, их протоки, эпидермис. В зависимости от внешнего вида таких структур различают плоскоклеточный или железистый рак. Сами опухолевые клетки и их ядра уменьшаются в размерах, почти нормально окрашиваются ядерными красителями, приближаются по внешнему виду к обычному эпителию. Такие структуры окружаются вновь образованной волокнистой соединительной тканью — раковой стромой.

Появление стромы и структуризация раковых клеток — свидетельство дифференцировки опухоли, замедления ее роста, т.е. уменьшения злокачественности, агрессивности. Однако этот процесс не доходит до логического конца — клетки так и не вступают в тесный контакт между собой, образуя лишь неустойчивые группировки; в любой момент они вновь могут приобрести незрелый вид, а с ним и

способность к бурному делению и быстрому росту. При этом структурные признаки дифференцированности (железы, эпидермальные пласты) некоторое время еще могут сохраняться.

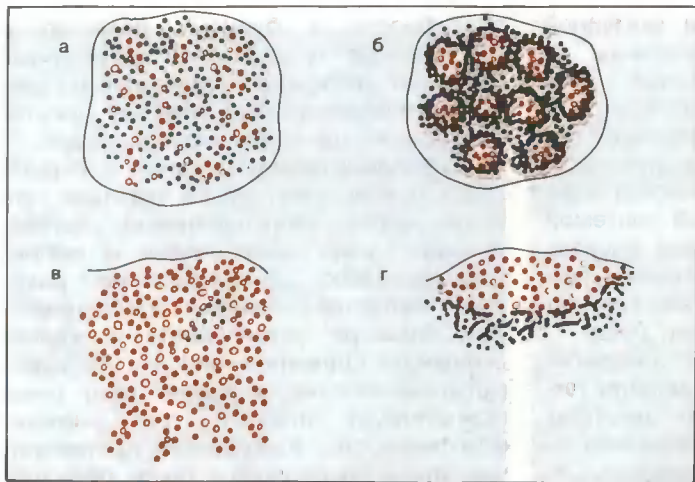
Соединительнотканная строма опухоли выполняет ту же функцию, что и в любом эпителиальном органе: питания, энергообеспечения и опоры. Следовательно, формирование раковым эпителием стромы обеспечивает ему большую устойчивость и жизнестойкость. Одновременно эта же строма механически замедляет рост рака, препятствует инвазии, т.е. снижает агрессивность. Кажущееся противоречие здесь разрешается таким образом: формируемая опухолью строма обеспечивает ей стабильность, более длительное существование, правда, за счет потери агрессивности.

#### **Агрессивный рак**

Быстро растущий рак не образует ни стромы, ни структур, напоминающих исходную ткань. Он спешит, ему некогда. На наблюдателя такой рак производит впечатление своей «дикостью» и «оголтелостью»: клетки и их ядра крупные, сочные, рыхлые, они складываются в тяжи и языки, которые внедряются и лизируют окружающие ткани, продвигаясь все вперед и вперед, не встречая сопротивления. Таков агрессивный рак в самых различных органах.

Но и на этого монстра находится управа. Дело в том, что быстро растущий рак в конце концов лишается «довольствия» — тут никакие ресурсы, никакой «бюджет» организма не выдержит (рак питается за счет своего организма), опухоль некротизируется, погибает (чаще — частично, реже — почти полностью).

Но и при тотальном некрозе (он называется трофическим — от недостатка питания) небольшое количество раковых клеток, как правило на периферии опухолевого узла, остаются. Они и служат источником возобновления роста. Трофический некроз раковой ткани можно отличить от ее разрушения иммунной системой. В первом случае под микроскопом погибшие участки



Схемы различных типов рака: а — регрессивный — раковые клетки (везде обозначены цветом) со всех сторон окружены клетками иммунной системы; б — дифференцированный (железистый) рак — образование стромы и специфических структур, напоминающих железы; в — агрессивный — сплошное поле раковых клеток, захватывающих все новые и новые ткани; г — *in situ* — опухоль окружена плотным лимфоцитарным валом, сдерживающим ее дальнейшее распространение.

опухоли — крупные и однообразные (мономорфные), во втором — пестрые, с большим количеством клеток-эффекторов защитной системы, чередованием мертвых и активных раковых клеток, картиной лизиса, фагоцитоза отдельных элементов и т.д.

Таким образом, в связи с морфологической картиной новообразования следует различать агрессивный, стабильный (дифференцированный) и регрессивный рак. Подобная характеристика морфолога — ценнейшая информация для клинического онколога, позволяющая судить о важнейшем качестве опухоли: скорости ее роста и агрессивности на момент операции или взятия диагностической биопсии.

Однако все не так просто. Дело в том, что реальная картина растущего рака настолько пестрая и динамичная, что с трудом поддается описанию и оценке. Все, как на войне: извивающаяся линия фронта (инвазии) с прорывами отрядов (раковых комплексов) через линию обороны (лимфоцитарный вал, фиброзную капсулу), глубокие рейды клеток защиты в тылы врага (опухолевого узла) с отсечением от него фрагментов, окружением и уничтожением их, отражением раковой атаки и т.д. и т.п.

В разных участках одной и той же опухоли видна то груда клеточных обломков (циторексис) и клеток со сморщенным (кариопикноз) или рас-

павленным (кариолизис) ядром, то хорошо структурированные раковые комплексы, то сплошная масса незрелых клеток опухоли, то лишенные ядер слизистые шарики. Здесь раковый вал остановился перед хрящевой пластинкой, там — зажат в рубце, по соседству тонкие тяжи опухоли протиснулись между волокнами, заняли периневрий, попали в сосуды.

Все, как в жизни: динамичность и изменчивость.

#### **Рак *in situ***

Рак *in situ* (на месте) не владеет основным тактическим приемом агрессора — наступать, проникать, захватывать, он не способен к инвазивному росту. Этакий застывший, «спящий» рак. При этом остальные признаки злокачественного новообразования налицо: незрелость клеток, их полиморфизм (разнообразие), отсутствие функциональной целесообразности образованной ими ткани. Онкологам хорошо известен рак *in situ* в многослойном плоскоклеточном эпителиальном покрове кожи и слизистых оболочек, но только ли в нем он может быть?

Наши наблюдения показали, что признаками рака *in situ* в полной мере обладают ворсинчатая опухоль кишки и аденоматозный полип с дисплазией эпителия желудочно-кишечного тракта. К тому же классу опухоли следует отнести болезнь Бовена, старческий



*Инфильтрация раковой опухоли; лимфоциты (2) находятся вокруг и между раковыми комплексами (1). Увел.200.*



*Лимфоцитарная инфильтрация раковой опухоли: между раковыми комплексами (1) лимфоциты внедряются в раковые клетки (2). Увел.140.*

кератоз и некоторые другие новообразования кожи.

Инвазии рака *in situ* мешает эффективная оборона. Под микроскопом она принимает вид широкого и плотного лимфоцитарного вала, окружающего раковый пласт, или диффузной инфильтрации стромы полипа эозинофилами, нейтрофилами и плазматическими клетками, блокирующими инвазивные потенции его эпителия.

#### МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

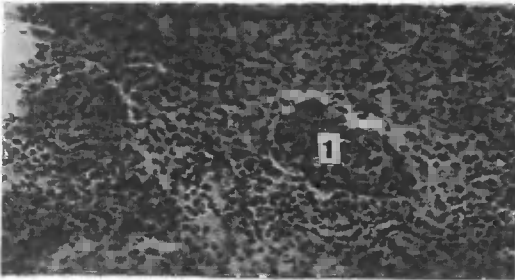
Под микроскопом хорошо видно, насколько местные защитные реакции разнообразны по внешнему виду и по своей тактической сути.

**Окружение.** Массив опухоли отграничен от окружающей ткани сплош-

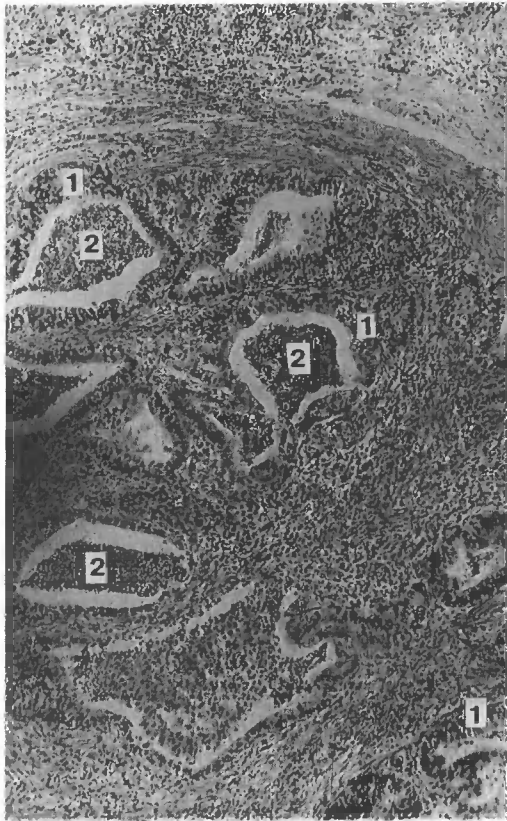
ным плотным широким лимфоцитарным валом. Соприкосновение раковой клетки с лимфоцитом ведет к ее гибели. Эти лимфоциты в большинстве своем — стимулированные раковым антигеном киллеры.

Однако чаще лимфоцитарный вал — тонкий, рыхлый, разорванный (прозрачный). Опухолевые комплексы «без видимого труда» проходят между редкими лимфоцитарными скоплениями («блокпостами»). Иногда группы лимфоцитов вблизи опухоли настолько редки, что назвать их окружением просто невозможно.

**Внедрение и уничтожение.** При гиперергии замедленного типа весь массив новообразования инфильтрирован лимфоцитами. Кроме них там присутствуют также макрофаги и не-



*Гиперергическая реакция замедленного типа в раковой опухоли. Виден деформированный раковый комплекс (1) в центре плотного лимфоцитарного инфильтрата. Увел. 80.*



*Гиперергическая реакция немедленного типа: расплавленная раковая ткань (1) в нейтрофильном гранулоцитарном инфильтрате (2). Увел. 80.*

большое количество гранулоцитарных лейкоцитов. Видно, как лимфоциты внедряются в раковые клетки, оставляя за собой их мертвые тела. В тех

редких случаях, когда разрушается почти весь раковый узел, мелкие комплексы или отдельные раковые клетки «зажаты» в инфильтрате, деформированы, сморщены, с темными (гиперхромными) и уродливыми ядрами, они принимают вид безъядерных шариков и клеток-теней. Их немного и найти их не просто среди лимфоцитов и макрофагов.

Описанная картина по существу идентична морфологии гиперергии (аллергической реакции) замедленного типа на повторное появление в организме антигена (в нашем случае — опухолевого). Так работает клеточный иммунитет, непосредственные исполнители которого (эффекторы) — Т-лимфоциты, преимущественно клетки-киллеры. Классическим примером неонкологической гиперергии замедленного типа служат внутрикожные туберкулиновые пробы на носительство микобактерии туберкулеза — реакции Манту и Пирке.

При гиперергической реакции немедленного типа раковая ткань инфильтрирована сегментоядерными нейтрофильными гранулоцитами, которые разрушают опухоль частично или (очень редко) целиком. В клеточном распаде мертвые раковые клетки перемешаны с погибшими гранулоцитами (гнойнными тельцами) и вся картина под микроскопом напоминает гной. Но это — не гнойное воспаление, а гиперергия немедленного типа. Она возникает в зоне повторного появления антигена, к которому в организме уже имеются циркулирующие в крови антитела (гуморальный иммунитет). Новая порция антигена и вызывает подобную бурную и быструю реакцию с некрозом ткани, подобную взрыву, от которого гибнет не только враг, но и все вокруг, включая мирных жителей.

Гиперергия немедленного типа хорошо известна медикам по феномену Артюса (некрозу кожи в участке повторного введения сыворотки или любого другого белка).

При смешанном типе реакции в новообразовании присутствуют почти все клетки-эффекторы иммунной системы, в том числе плазматиты и

эозинофилы. Один из результатов такой оккупации — ослизнение опухоли.

**Блокада.** К этому виду защиты организма от опухоли следует отнести отграничение ракового узла от нормальной ткани «глухой стеной» — фиброзной капсулой, а также формирование опухолевой стромы. Основные действующие лица в этих случаях — фибробласты, «специалисты» по ремонту и строительству соединительной ткани. Таким образом, противораковая защита включает в себя все возможные тактические приемы (реакции) иммунной системы в борьбе с носителем чужого антигена.

#### Региональная защита

Как только иммунная система обнаружит опухоль, немедленно включаются в работу регионарные лимфатические узлы (по функции — районные отделы УВД). Они увеличиваются в размерах в результате размножения (пролиферации) в них стимулированных раковым антигеном лимфоцитов, макрофагов и плазматиков, каждый из которых имеет свою «привязку на местности».

Ответственные за клеточный иммунитет «бойцы-киллеры» — Т-лимфоциты занимают среднюю (паракортикальную) зону лимфоузла. Фолликулы наружной (кортикальной) зоны активизируются и «выпускают в свет» плазматические клетки — производителей специального противоопухолевого антитела. Антитела поступают в лимфу, затем в кровь, стараясь обеспечить противораковый гуморальный иммунитет. Макрофаги «предпочитают» синусы лимфоузла, которые они дружно заселяют сплошной массой, буквально закрывая своими телами путь продвижения раковых клеток.

Стимулированные «новобранцы» — макрофаги и Т-лимфоциты доставляются лимфой из лимфоузлов прямо «на фронт», т.е. в опухолевый очаг. Небольшие группки раковых клеток уничтожаются макрофагами непосредственно в синусах лимфоузлов.

При болезнях иммунной системы (иммунодефицитах), глубокой старчес-

кой ее инволюции или, наконец, при быстро повторяющихся массовых поступлениях раковых клеток, которые оккупируют лимфоузел, уничтожая и замещая его клетки, развивается метастаз.

Однако этот процесс проходит для опухоли не всегда гладко. «Сдаче» лимфоузла предшествуют «ожесточенные бои», отражение которых хорошо видно под микроскопом. В частности, неоднократно пришлось наблюдать разрушение крупного метастаза рака, занимавшего большую часть или даже весь лимфоузел. На месте бывшей опухоли с трудом удавалось обнаружить только мелкие группки раковых клеток-теней и безъядерных шариков, а также роговые массы (рак ороговевающий), окруженные гранулами из гигантских клеток рассасывания инородных тел, соединительной тканью и воспалительным инфильтратом.

#### РАКОВОЕ ПОЛЕ

Давно замечено, что очажки раковой ткани появляются одновременно или последовательно в разных точках некоторой территории, составляющей часть органа. Такие очажки могут иметь даже разное гистологическое строение. Увеличиваясь в размерах, очажки сливаются, образуя крупный опухолевый узел. Территория, в пределах которой вспыхивает «раковый путч», называется раковым полем, а принцип возникновения опухоли — мультицентричным или аутохтонным.

Морфологическое исследование маленьких раков показало, что раковое поле представляет собой весьма конкретное понятие, причем разное в различных органах. Так, в молочной железе оно совпадает с участком мастопатии или инволютивного (старческого) фиброза, в легком — с зоной гипоплазии, в щитовидной железе — с территорией, занятой остатками эмбрионального протока или фолликулярной аденомы, в коже — с различными родинками и гамартомами. В желудке рак возникает в зоне хронической язвы, послеязвенного рубца, полипа,

гипоплазии и атрофии стенки, гамартомы (поджелудочной железы) и т.д.<sup>5</sup> Похожая ситуация с толстой (и прямой) кишкой. Там «стартовой площадкой» для рака служат те же процессы, что и в желудке, а также дивертикул и эндометриоз.

Перечисления можно продолжить, но суть явления такова: рак возникает в зоне структурных или биохимических ненормальностей ткани, порочно развитой, недоразвитой (гипоплазированной) или поврежденной в ходе хронического воспаления или гормональной дисфункции.

Топография вкраплений тканевых «уродцев» в каждом органе довольно постоянна. Она совпадает с локализацией эмбриональных зачатков, прекративших свою функцию (и существование) сразу же после рождения, с местом стыка различных по гистологическому строению типов слизистой оболочки (в желудке, кишке), с анатомическими изгибами органа (например, кишки) и т.д. И что особенно важно, в этих же участках возникает опухоль.

В чем же причина онкологической предрасположенности пороков развития и гипоплазии? На наш взгляд, дело в следующем. В порочно развитых или недоразвитых участках ткани функция клеток извращена и поэтому не нужна или даже вредна организму, который и пытается избавиться от «горе-работяг». Срок жизни таких клеток укорачивается, а значит, интенсифицируется скорость их деления, что чревато возникновением рака. В связи с извращением функции (или ее потерей) в порочно развитом фрагменте органа усиливается канцерогенный эффект химических веществ, попадающих сюда: в дивертикуле или участке гипоплазии кишки удлиняется контакт с кишечными токсинами, в зоне кишечной метаплазии слизистой желудка нормальную секрецию заменяет всасывание (токсинов) и т.д.

## «ЖИЗНЬ НУЖДАЕТСЯ В СМЕРТИ»

Попытаемся ответить на вопрос о биологическом смысле злокачественной опухоли, приводящей к смерти как ее носителя, так и себя самой.

Повторим условия задачи. Известно:

— рак возникает из клеток самого организма в результате приобретения ими некоторой самостоятельности в части, касающейся регуляции двух противоположных процессов — размножения и дифференцировки;

— растущая опухоль вызывает иммунную реакцию, направленную против нее;

— устранение внешних канцерогенных воздействий может лишь снизить заболеваемость раком, но ни в коем случае не ликвидировать ее совсем. Следовательно, существуют внутренние стимулы развития новообразования;

— предрасположенность к раку того или иного органа носит семейный (наследственный) характер.

Наши наблюдения показали, что:

— поведение растущего рака в органе больше всего попадает под определение «агрессия»;

— иммунная система способна приостановить рост опухоли, а также частично или (редко) полностью разрушить ее;

— для прогноза и выбора методов лечения онкологического заболевания необходимо иметь представление о скорости роста опухоли, определяемой по степени ее гистологической незрелости и эффективности местных иммунных реакций. В этой связи целесообразно выделение трех морфологических типов рака: агрессивного, стабильного (дифференцированного) и регрессивного;

— агрессивность, стабильность и регрессия — понятия не застывшие, а, наоборот, подвижные, меняющиеся во времени. Одна и та же опухоль в различных участках приобретает то признаки первой, то второй, либо разрушается;

— рак возникает в зоне локаль-

<sup>5</sup> Несветов А.М., Рохлин Э.А., Шустеров М.И. // Архив патологии. 1974. № 9. С.24—31; Несветов А.М. Вopr. онкологии. 1980. № 7. С. 26—31.



ных структурных тканевых нарушений, разбросанных в виде вкраплений в разных органах. Хорошо известно, что «стартовой площадкой» для него служат также гормонозависимые органы в условиях патологической гормональной стимуляции.

Остается непонятным:

— почему раковая клетка, неудержимо размножаясь, «сама себе роет могилу», приводя к смерти организм?

— почему организм, пытаясь разрушить опухоль при помощи своей иммунной системы, в то же время помогает ей выжить, питает ее, формирует ее строму? Создается впечатление, что он (организм) как бы лелеет свою опухоль, организует ее жизнь;

— какой механизм обеспечивает скорость роста рака, какие причины меняют эту скорость в течение его существования? О смене скорости роста свидетельствует, в частности, пестрота и динамичность морфологической картины;

— почему у пожилых не работает иммунный контроль — ведь от рака умирает каждый второй старик? У 90-летних людей в злокачественную опухоль превращается буквально любая невинная бородавка или родинка на коже, даже маленькая ангиома или полип.

— почему, наконец, организм, за редчайшим исключением не может справиться с опухолью? Ведь альтернатива победы над раком — его собственная гибель!

Итак, попытаемся решить задачу. По нашему мнению, в любой сложной биологической системе имеется механизм самоуничтожения, работающий по ступенчатой схеме. В частности, он включает в себя рассеянные по органам и тканям структурные и

ферментные отклонения от нормы (уродства развития, гипоплазии и др.). В таких участках клетки обновляются активнее и, главное, неадекватно потребностям органа, там чаще возникают мутационные процессы. До поры до времени эти процессы находятся под жестким контролем иммунной системы организма. На излете жизни контроль ослабевает или снимается. Подтверждением этому служат очевидные морфологические изменения у стариков в иммунокомпетентных органах: тимусе, костном мозге, селезенке, лимфоузлах и в других лимфатических образованиях, где лимфатическая (и костномозговая) ткань замещаются жировой или фиброзной. Бесконтрольные и «безнаказанные» клеточные мутации в зоне порочно развитых или недоразвитых структур, а также в гормонозависимых органах — причина появления там злокачественной опухоли. Эти зоны — своеобразный стартовый комплекс для «запуска» рака. Вкрапления структурно-ферментных неправильностей в органах и гормональные отклонения наследуются, они генетически обусловлены и поэтому легко объясняют семейную предрасположенность к раку того или иного органа (матки, легкого и т.д.).

Таким образом, организм готовится к смерти с самого рождения. Механизм самоуничтожения заложен в его геноме, и злокачественная опухоль — важнейший технологический прием, обеспечивающий своевременную уборку биологических систем и «расчистку места» для следующих их поколений. Новообразование — универсальный, безотказный биологический аппарат смены поколений, т.е. в конечном итоге — торжества жизни на нашей, как говорят, «грешной» Земле.

# Строительство минерального скелета древнейшими организмами

Г. Т. Ушатинская, Л. М. Герасименко



*Галина Тихоновна Ушатинская, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Палеонтологического института РАН. Область научных интересов — изучение древнейших брахиопод. Автор более 70 научных статей и четырех монографий, в том числе: «Древнейшие лингуляты» (М., 1995). В «Природе» опубликовала статью «Брахиоподы с фосфатной раковинной» (1991. № 11. С.83–88).*



*Людмила Михайловна Герасименко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института микробиологии РАН. Занимается исследованием современных и древних цианобактерий. Автор более 80 научных публикаций и двух монографий: «Роль серосодержащего нуклеотидпептида в клеточном делении водорослей» (в соавторстве с С.В.Горюновой и М.А.Пушевой. М., 1980); «Кальдерные микроорганизмы» (коллективная монография под редакцией Г.А.Заварзина. М., 1989).*

## ЖИЗНЬ В ДОКЕМБРИИ

На ранних этапах истории нашей планеты (3–3.5 млрд лет назад) единственными ее обитателями были безъядерные (прокариотные) организмы — бактерии, в том числе цианобактерии, или синезеленые водоросли. Населяя водоемы на поверхности Земли, они, вероятно, занимали обширные пространства и, будучи многочисленными, оставили после себя продукты своей жизнедеятельности —

строматолиты. Эти слоистые образования, состоящие из карбоната кальция, кремнезема или из фосфата кальция, иногда достигают мощности в сотни метров и очень широко распространены среди докембрийских осадочных отложений<sup>1</sup>. Процесс их образования Х.Лоуэнстам определил как самый ранний способ биоминерализации, возникший на Земле в глубоком

<sup>1</sup> Крылов И.Н. Древнейшие следы жизни (по материалам 27-й сессии Международного геологического конгресса) // Природа. 1985. № 9. С.68–76.

докембрии<sup>2</sup>. Он назвал его «биологически индуцируемой» минерализацией, подразумевая, что минералы образуются в результате взаимодействия выделяемых организмами продуктов метаболизма с неорганическими катионами внешней среды.

Но с конца верхнего протерозоя цианобактериальные сообщества (а с ними строматолиты) начали постепенно вытесняться более приспособленными конкурентами. Этот процесс достиг особой интенсивности с начала палеозоя. В наши дни скопления цианобактериальных сообществ встречаются только в экстремальных условиях, как правило, не пригодных для жизни других организмов: при высоких значениях температуры (в гидротермальных источниках), солености или щелочности (в мелких лагунах аридных зон, где по-прежнему нередко можно встретить строматолиты) или же, наоборот, при низкой температуре (в антарктических озерах).

Когда на Земле впервые появились эвкариоты — организмы с клеточным ядром, — сказать трудно, возможно 1.7—2 млрд лет назад. Во всяком случае во второй половине позднего протерозоя и особенно в его конце — вендском периоде — эвкариоты были уже широко распространены и среди них значительное место принадлежало древнейшим многоклеточным животным. Все они были мягкотелыми, т.е. не имели ни минерализованных раковин, ни панцирей, а их покровные и опорные структуры состояли целиком из органического вещества<sup>3</sup>.

Первые организмы с минеральным скелетом — *Cloudina* — были найдены в Южной Африке и Аравии в отложениях верхней части докембрия, но их систематическое положение установить не удалось. А в начале кембрия (560—570 млн лет назад) — в томмотское время — почти одновременно на Земле появилось множество животных с минераль-

ным скелетом: археоциаты, губки, моллюски, брахиоподы и большая группа проблематичных организмов с общим названием — мелкие раковинные ископаемые. Среди последних встречаются скелеты цельных организмов, близких к червям, моллюскам или простейшим. А есть образования, которые, вероятно, представляют собой лишь часть твердых покровов каких-то вымерших животных. Реконструировать их очень сложно. Немного позднее, в начале следующего века (атдабанского), появились первые членистоногие, а в конце его — первые иглокожие<sup>4</sup>.

Минеральный скелет животных тех времен строился в основном из карбоната кальция или из фосфата кальция. Однако были организмы, которые создавали свои твердые покровы или только их часть из окислов кремния, железа, марганца и ряда других соединений. По определению Лоуэнстама, минеральный скелет формировался «биологически матрицируемым» путем: появление и последующее отложение скелетных минералов контролировалось органической матрицей — заранее образованной особой тканью или клетками<sup>5</sup>. Значит, организмы осуществляли контроль над процессами минералообразования.

Таким образом, за сравнительно короткий промежуток у многих известных в настоящее время типов животных возникла способность строить минеральный скелет, и животный мир приобрел «фанерозойский» облик, который определил его дальнейшую эволюцию и дошел до современности.

#### СОБЫТИЯ, ПРЕДШЕСТВОВАВШИЕ ПОЯВЛЕНИЮ СКЕЛЕТНОЙ ФАУНЫ

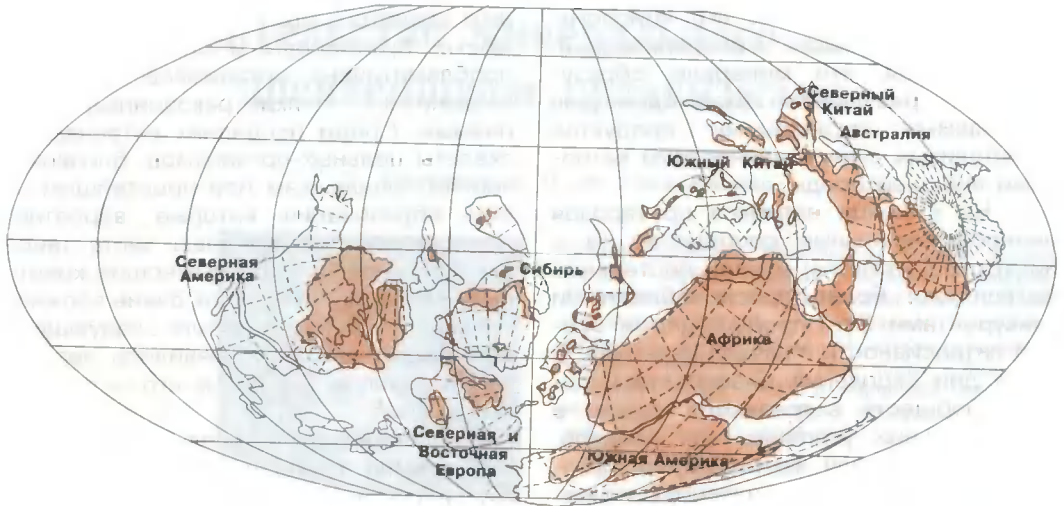
Что же послужило причиной, вызвавшей появление минерального скелета у многих групп организмов на границе кембрия? По этому поводу вы-

<sup>2</sup> Лоуэнстам Х. Процессы и продукты биоминерализации и эволюция биоминерализации. Тез. докл. 27-го Международного геологического конгресса. М., 1984. Т.2. С.51—56.

<sup>3</sup> Федонкин М.А. Загадки вендской фауны // Природа. 1989. № 8. С.59—72.

<sup>4</sup> Розанов А.Ю. Что случилось 600 миллионов лет назад. М., 1986.

<sup>5</sup> О биоминерализации и органической матрице, которая трактуется несколько иначе, см.: Голубев С.Н. Живые кристаллы // Природа. 1989. № 3. С.13—21.



*Расположение материков к началу раннего кембрия (по Мак-Керроу и др., 1992).*

сказывалось не меньше предположений, чем о причинах вымирания динозавров. По некоторым гипотезам, скелетные организмы существовали и ранее, но обитали на ограниченных территориях, скорее всего в глубоководных условиях. А поскольку породы, заключавшие их, впоследствии подверглись метаморфизму, найти скелетные остатки животных в настоящее время весьма непросто. По другим гипотезам, раннекембрийские скелетные организмы считаются потомками мягкотелых протерозойских предков, а появление минерального скелета связывается или с изменением химизма воды в древних бассейнах, или с воздействием космических лучей, которое вызвало мутации, приведшие к образованию твердых покровов. Рассматриваются также и другие причины, заставившие мягкотелых животных строить скелет: появление хищников или переход от пелагического образа жизни к бентосному.

Работы двух последних десятилетий показали, что на границе докембрия и кембрия действительно произошли серьезные изменения в гидрохимии морских бассейнов. Толчком для таких изменений послужили глобальные абиотические события на Земле. Во время, предшествовавшее кембрию, огромные участки земной коры представляли

собой общий нерасчлененный материк, омываемый Мировым океаном, — Палеопангею. Температурный градиент между экватором и полярными областями в это время был невелик, а циркуляция океанских вод ослаблена. Это привело к захоронению большого количества органического вещества вместе с соединениями фосфора, серы, кальция, железа, других элементов и повлекло за собой повышение содержания кислорода в атмосфере.

В конце докембрия Палеопангея раскололась на ряд крупных плит и началось их перемещение друг относительно друга. Благодаря этому океаническая циркуляция возобновилась, в круговорот было вовлечено прежде захороненное органическое вещество, которое стало интенсивно окисляться, а воды обогатились кальцием, фосфором, серой, углекислым газом. После раскола и начала перемещения литосферных плит в низких широтах возникли многочисленные эпиконтинентальные моря, куда проникли эти насыщенные разнообразными элементами воды. Естественно, что обогащение ими морей должно было сказаться на продуктивности фитопланктона, который в то время был представлен водорослями. Кроме прокариотных синезеленых водорослей (цианобактерий) в это время в морях были широко распространены эвкарриотные — пиррофитовые, красные, зеленые и некоторые другие группы во-

дорослей. Действительно, изотопный состав углерода подтверждает, что увеличилась масса фитопланктона в начале томмотского века. Соотношение изотопов углерода —  $^{12}\text{C}$ , который легче усваивается растениями, и  $^{13}\text{C}$  — свидетельствует о дефиците последнего в породах, а значит, и об их органическом, фитогенном происхождении. Заметим, что одновременно в осадочных отложениях многих районов Земли повысилось содержание фосфора. К этому же времени, началу кембрия, приурочены крупнейшие фосфоритовые месторождения мира.

#### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЗМА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ВОДОРОСЛИ

Итак, химизм эпиконтинентальных морей изменился. Как могли реагировать на это населявшие их растения и животные? Мы провели лабораторные эксперименты с цианобактерией *Microcoleus chthonoplastes*, чтобы выяснить, как влияют на нее разные концентрации биогенных элементов, в том числе фосфора, в среде (напомним, это был один из самых распространенных элементов в начале кембрия<sup>6</sup>). Эта нитчатая галофильная цианобактерия доминирует в современных цианобактериальных матах в условиях переменной солености. Оптимальная концентрация фосфора в среде, обеспечивающая жизненно важные процессы *Microcoleus*, как оказалось, составляет 4 мг/л. (В современных морях такие условия иногда характерны для придонных слоев.) Выяснилось, что при снижении концентрации фосфора рост культуры замедляется, а если увеличить содержание до 18—36 мг/л, этот элемент накапливается внутри клетки в виде полифосфатных гранул. Очень быстро — буквально в первые три часа — клетки цианобактерий почти целиком заполняются такими гранулами; в них находится до 80% фосфора. В результате, в клетках его оказывается значительно больше, чем во внешней среде. Клетки цианобактерий набирают предельное количество фосфора



*Клетки цианобактерии Microcoleus chthonoplastes, выращенной при недостатке фосфора в питательной среде (вверху) и при его избытке (18 мг/л). Видно, что при столь высокой концентрации уже через 20 мин после внесения в среду фосфора клетки наполняются полифосфатными гранулами (Увел. 1500).*

при его концентрации 36 мг/л, но если она увеличивается и дальше, вокруг нитей откладывается минеральный фосфат кальция, а затем культура гибнет. Подобно цианобактериям полифосфатные гранулы накапливают при увеличении концентрации фосфора и клетки ряда других водорослей, например современной зеленой водоросли *Chlorella*.

Итак, цианобактерия *M.chthonoplastes* чутко отзывается на изменение концентрации фосфора в питательной среде, а при большом его избытке создает минеральный чехол, т.е. фактически фоссилизируется.

<sup>6</sup> Герасименко Л.М., Гофчарова И.В., Жегалло Е.А. и др. // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 2. С.208—214.

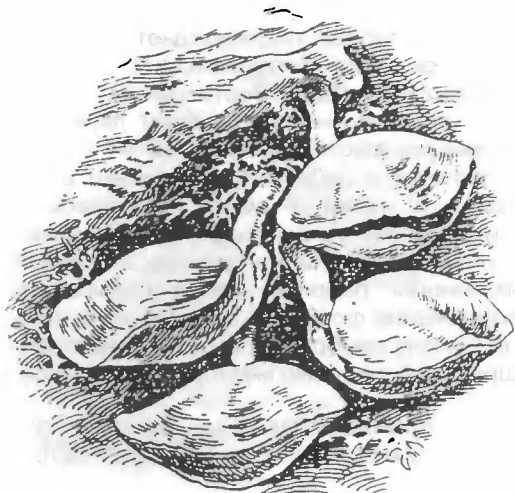
Эта лабораторная модель сослужила нам прекрасную службу — дала материал для обоснования одного из вариантов гипотезы возникновения скелета. Правда, для этого мы привлекли также данные о колебаниях концентрации фосфора в водах Мирового океана. В своей гипотезе мы рассматривали формирование скелета на примере брахиопод (плеченогих) — группы беспозвоночных животных, приобретших его в самом начале кембрия.

#### БРАХИОПОДЫ ПРИОБРЕТАЮТ РАКОВИНУ

Среди брахиопод в отличие от всех других типов имеются две линии: у животных одной линии раковины состоят из карбоната кальция, другой — из фосфата, причем карбонатные появились лишь чуть позже, чем фосфатные. Потомки и тех, и других живут в современных морях. И те, и другие ведут неподвижный образ жизни (т.е. прикреплены к морскому дну), а по типу питания относятся к пассивным сестонофагам. Иначе говоря, они питаются взвешенными в воде пищевыми частицами, которые улавливают с помощью лофофора — специального органа, служащего для создания тока воды из окружающей среды к ротовому отверстию.

Помимо состава скелета современные фосфатные и карбонатные брахиоподы различаются и характером потребляемой пищи.

По данным Ш.Чуанга, в тканях желудка и кишечника *Lingula unguis* — современной беззамковой брахиоподы с фосфатной раковиной — содержится амилаза, гидролизующая углеводы, которые входят в состав растительной клеточной стенки<sup>7</sup>. Остальные фосфатные брахиоподы принципиально не отличаются от лингулы. Присутствие таких ферментов дает возможность фосфатным брахиоподам использовать пищу растительного происхождения, содержащую полисахариды. Не удивительно, что лингулы освоили литоральную область теплых морей, где фитопланктон



*Плеченогие на субстрате. Видны стембельки, или ножки, которыми животные прикрепляются к морскому дну.*

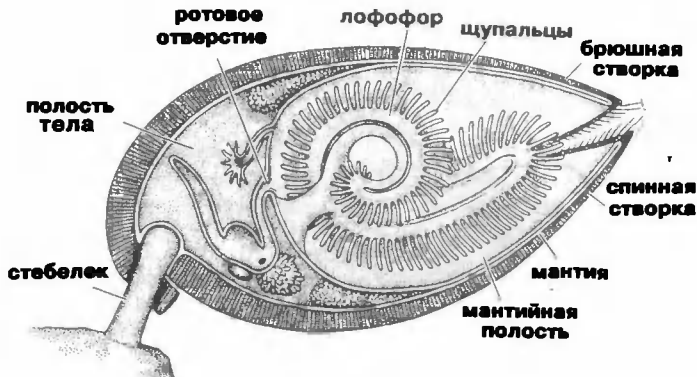
очень обилен, и обитают в ее пределах уже на протяжении 500 млн лет.

У замковых же брахиопод, обладающих карбонатными раковинами, водоросли никогда не были важным компонентом в меню: все изученные их современные представители почти не содержат в железах водорослевых клеток. Скорее всего замковые брахиоподы питаются агрегатами бактериальных клеток или скоплениями органического вещества — остатков животных, т.е. животными белками. При содержании в аквариуме замковые брахиоподы чрезвычайно отрицательно реагируют на введение туда фитопланктона. Сперва они выводят его с помощью слизи, которая выделяется для защиты лофофора от неподходящей пищи, а при длительном поступлении фитопланктона совсем перестают питаться, захлопывают раковину и гибнут.

Для строительства карбонатного скелета кроме растворенного в воде углекислого газа требуются ионы кальция, а для фосфатного — еще и ионы фосфора. Но и кальций, и фосфор нужны не только для этой цели. Оба элемента необходимы любой клетке для метаболических процессов. Фосфор по праву считается основным элементом жизни: он входит в состав ферментов,

<sup>7</sup> Chuang S.H. // Quart. H. Microsc. Sci. 1960 V.101. P.9—18.

Схема строения брахиоподы.



ДНК и РНК, а также молекул АТФ, поставляющих энергию для реакций клеточного метаболизма, содержится в нервных тканях. Ионы кальция принимают участие в регуляции пищеварения, метаболизме гликогена в печени, мышечных сокращениях, секреции гормонов, нейромедиаторов и пищеварительных ферментов, с помощью  $\text{Ca}^{2+}$  осуществляется транспортировка солей и воды через выстилку кишечника. Так что строительство минерального скелета на основе кальция или кальция и фосфора — еще один путь использования этих элементов в живой природе.

Как же они попадают в организм? С.М.Пен и Н.Ватабе установили, что раковина современной фосфатной брахиоподы *Glottidia pyramidata* образуется за счет кальция, поступающего через лофофор из морской воды, главным же источником фосфора служит пища<sup>8</sup>. Вероятно, так же было и у древних — кембрийских — брахиопод.

Теперь представим себе обстановку, сложившуюся к началу кембрия на территории современной Сибирской платформы, откуда известны самые ранние томмотские брахиоподы с фосфатной раковиной. Эта часть Земли в то время располагалась вблизи экватора и была покрыта морскими водами. Узкая протяженная полоса в центральной части платформы, так называемая переходная зона,

играла роль седиментационного барьера между обширной лагуной с соленосным осадконакоплением, с одной стороны, и открытым глубоководным морем с нормальной соленостью — с другой. Это было морское мелководье с активным движением воды, с температурой, достигавшей, по некоторым данным, 30–50°C. Вероятно, воды были богаты пищевыми ресурсами и обеспечены кислородом.

В начале томмотского века именно в этой полосе появились первые известные на Земле археоциаты, моллюски, червеподобные скелетные организмы, животные неясного систематического положения. Представляется, что здесь же обитали и мягкотелые предки брахиопод, среди которых имелись две ветви: одна, использовавшая растительную пищу, и вторая, питавшаяся «животными белками». Те, что были «растительноядными», в начале томмотского века стали получать в пищу водоросли, переполненные полифосфатными гранулами (напомним, что при избытке солей фосфора в среде он накапливается именно в таких гранулах). Возникла необходимость выводить из организма излишки фосфора. Возможно, он накапливался в вакуолях наружного эпителия, соединялся там с ионами кальция и в виде мелких кристаллитов попадал в органические покровы — так сейчас и происходит образование раковины.

Можно предположить, что похожим способом приобрели минеральную раковину и карбонатные брахиоподы. Их первые находки известны в той же

<sup>8</sup> Watabe N., Pan C.M. // Amer. Zool. 1984. V.24. P.977–985.

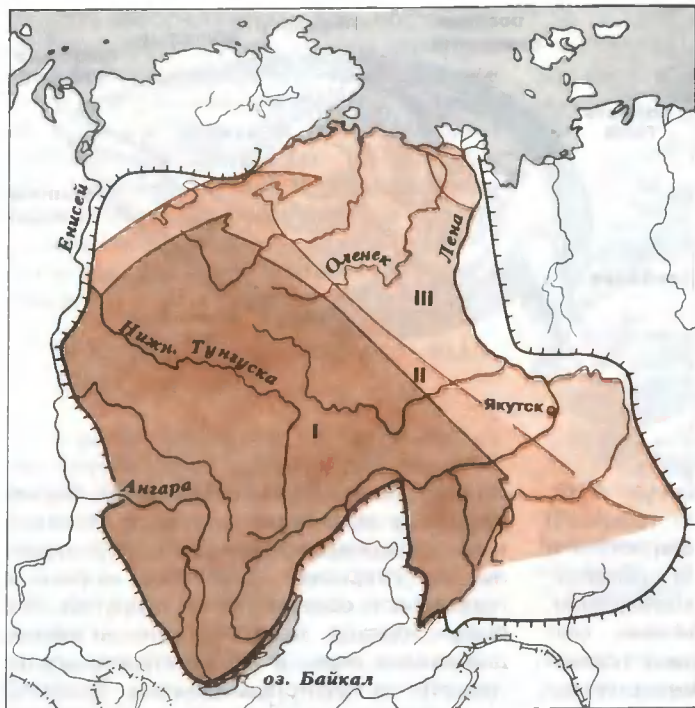


Схема расположения морского бассейна на Сибирской платформе в раннем кембрии. I — лагунная зона, II — переходная, III — открыто-морская. Центром происхождения ряда групп раннекембрийских животных была переходная зона (по Розанову, 1986).

переходной зоне на Сибирской платформе, но несколько позже — во второй половине томмотского века. Это время, по данным М.Брасье и других исследователей, характеризуется увеличением значений  $\delta^{13}\text{C}$ , т.е. указывает на уменьшение фитопродуктивности<sup>9</sup>. Иными словами, возникли более благоприятные условия для обитания животных, не усваивавших растительную пищу. Но если уменьшилось количество фитопланктона, то концентрация углекислого газа в морской воде увеличилась. А значит, в воде, проходившей через лофофор у предков карбонатных брахиопод,  $\text{CO}_2$  стало больше, чем прежде и чем требовалось для жизненных процессов. Животные вынуждены были искать способ избавляться от излишков. И будущие карбонатные брахиоподы пошли сходным с фосфатными путем (скорее всего обусловленным генети-

чески). Это дало и близкий результат — минерализованный наружный покров.

Лоуэнстам — один из основоположников учения о биоминерализации — писал, что «биологически матрицируемая» минерализация, используемая различными организмами при построении твердых скелетов — это их «*ноу хау*». Она унаследована ими от общего докембрийского предкового ствола и свидетельствует о единстве происхождения органического мира. Мы тоже не сомневаемся в этом. Именно тогда, к началу кембрия, на Земле возникли многочисленные теплые эпиконтинентальные моря; изменился химизм океанских вод, в том числе повысилось содержание фосфора; фитомасса в одни интервалы увеличивалась, в другие уменьшалась, а вслед за ней менялась и концентрация углекислоты. Все это послужило спусковым крючком почти для одновременного строительства твердого минерального покрова мягкотелыми животными.

<sup>9</sup> Derry Z.A., Brasier M.D., Corfield R.M., Rozanov A.Yu., Zhuravlev A.Yu. // Earth and Planetary Science letters. 1994. V.128. P.671—681.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда, гранты 6W000 и 6W300.



# Происхождение пермских «рябчиков» северо-востока России

Ю. А. Колясников,

кандидат геолого-минералогических наук

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН  
Магадан

**С**РЕДИ морских верхнепермских отложений Яно-Колымской складчатой системы (обрамления Охотского и Омолонского срединных массивов) внимание исследователей давно привлекают весьма необычные широко распространенные образования. Эти немые, неслоистые, темно-серые глинистые осадочные породы содержат рассеянный несортированный светлый песчаный и гравийно-галечный материал, за что получили образное название «рябчики». Встречаются они по всему разрезу верхней перми, занимая площадь до миллиона квадратных километров, но сосредоточены только в атканской свите мощностью 500—700 м, датированной казанским веком.

Первые работы по генезису «рябчиков» появились еще в 50-х годах, но однозначного решения этого вопроса нет до сих пор<sup>1</sup>. Эти экзотические «мусорные» отложения интерпретируются как туфогенные, ледово-морские, подводно-оползневые или смешанные, вулканическо-оползневые, и даже сугубо тектонические. Но для каждой гипотезы есть серьезные контраргументы. В связи с циклом

работ по лавинной седиментации<sup>2</sup>, среди разнообразных продуктов которой есть близкие аналоги «рябчиков» (подводные сели), наиболее вероятным представляется подводно-оползневое происхождение этих странных отложений. В то же время площади их распространения в верхнепермском Верхояно-Колымском окраинном море, вплоть до современного устья р. Лены, превышают возможности подводных оползней даже в современных океанах. Похоже, что для выхода из обозначившегося тупика необходим некий новый подход.

На сегодня установлены три имеющих прямое отношение к генезису «рябчиков» достоверных геологических факта.

В конце перми на месте Охотско-Чукотского вулканического пояса параллельно современной береговой линии Охотского моря протягивалась палеозойско-мезозойская Тайгонская андезитовая геосинкинали<sup>3</sup>. Ее строение аналогично современным островным дугам, т.е. гирлянда разрозненных вулканических островов имела с северо-запада окраинное море, а с юго-востока — глубоководный желоб. Вулканы дуги наряду с изолированными центрами в ак-

ватории окраинного моря составляли обломочный материал для «рябчиков» в осадки верхнепермского моря.

В отложениях атканской свиты несомненны признаки крупных, если не катастрофических или лавинных обвально-оползневых и селевых явлений, сопровождавших нормальную седиментацию.

Слабая окатанность мелкого «мусорного» обломочного материала свиты сочетается с хорошо окатанной галькой и валунами глинистых сланцев.

Что касается версий происхождения этих пород, то одна из них — эффузивная гипотеза не выдерживает критики в связи с постоянным присутствием в составе гальки «рябчиков» местных литологических разновидностей (так, в Западном Верхоянье галька представлена карбонатными породами Сибирской платформы). Ледово-морская природа не согласуется с палеотемпературными данными и большой мощностью толщи при практическом отсутствии слоистости (последняя неизбежна в отложениях, накопление которых связано с сезонными колебаниями температур).

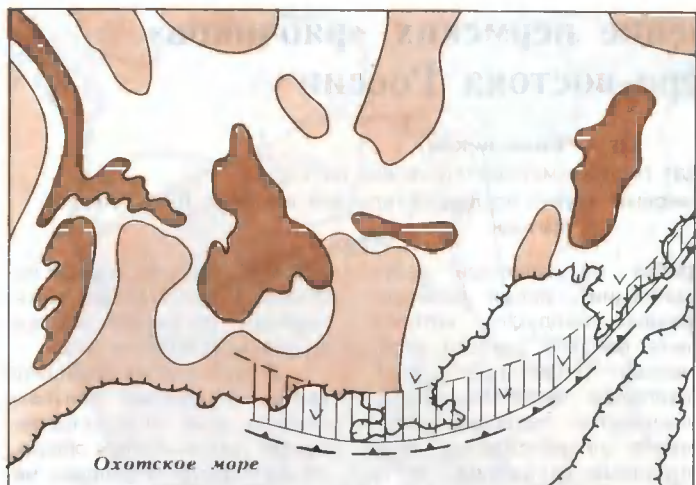
Итак, налицо ситуация, когда недостает какого-то, пока не привлекавшегося к решению проблемы, фактора, по-видимому, главного в генезисе «рябчиков». Им может быть воздействие катастрофических волн. В нашей недавней работе рассматривался возможный механизм зарождения цунами и их инициирующая роль в образовании таких экзоти-



© Ю.А.Колясников

<sup>1</sup> Бяков А.С., Ведерников И.Л. Стратиграфия пермских отложений северо-восточного обрамления Охотского массива, центральной и юго-восточной частей Аян-Юрхского антиклинория. Магадан, 1990.

<sup>2</sup> См., напр.: Лисицын А.П. // Литология и полез. ископаемые. 1983. № 5. С. 3—27; 1986. № 4. С. 3—28.

<sup>3</sup> Белый В.Ф., Гельман М.Л., Паракецов К.В. // Сов. геология. 1989. № 4. С. 62—76.



-  Современная береговая линия
-  Выходы «рябчиков»
-  Верхнепермская суша
-  Тайгоносская андезитовая геосинклиналь
-  Палеосейсмическая зона

*Схема распространения «рябчиков» в бассейне верхнего течения рек Яны и Колымы (По: Белый В.Ф. и др., 1989.)*

ческих образований, как олистостромы и дикий флиш<sup>4</sup>.

С вулканизмом Тайгоносской андезитовой островной дуги очевидно связаны землетрясения. Как и ныне, они провоцировали не только пульсации лавинной седиментации рыхлого материала, но и гравитационные подводные оползни и обвалы крупных блоков-пластин коренных палеозойских пород с внешнего склона дуги в направлении глубоководного желоба<sup>5</sup>. Корни этих покро-

вов фиксируются сейчас в виде полос серпентинитового меланжа в береговых обрывах п-ова Тайгонос и др. Такие срывы блоков фундамента приводили к возникновению цунами с амплитудой, пропорциональной мощности пластин. В нашем веке в Тихом океане зафиксированы цунами высотой около 50 м, в геологическом же прошлом, судя по размерам сползавших офиолитовых пластин, при меньшей глубине океанов их амплитуда могла составлять 100 м и более. Наиболее разрушительное действие цунами испытывает береговая полоса в непосредственной близости от сорвавшегося блока, откуда вода в процессе ускорявшегося сползания суши сначала уходит вслед за аллохтоном

сенных на большие расстояния)<sup>6</sup>. В случае Тайгоносской андезитовой дуги палеоцунами максимально воздействовали на самую грядку разрозненных невысоких вулканических островов. Проходя ее, волны смывали с пляжей и склонов несортированный, в разной степени окатанный материал, преимущественно андезитовый. Затем он разносился в составе спровоцированных катастрофическими волнами подводных оползней на сотни километров в глубь окраинного бассейна, вытянутого в северо-западном направлении. При глубине древнего моря даже в 1.5–1 км цунами такой амплитуды приводили в движение водную массу на всю глубину, вызывая гигантские подводные оползни в направлении центральной котловины моря.

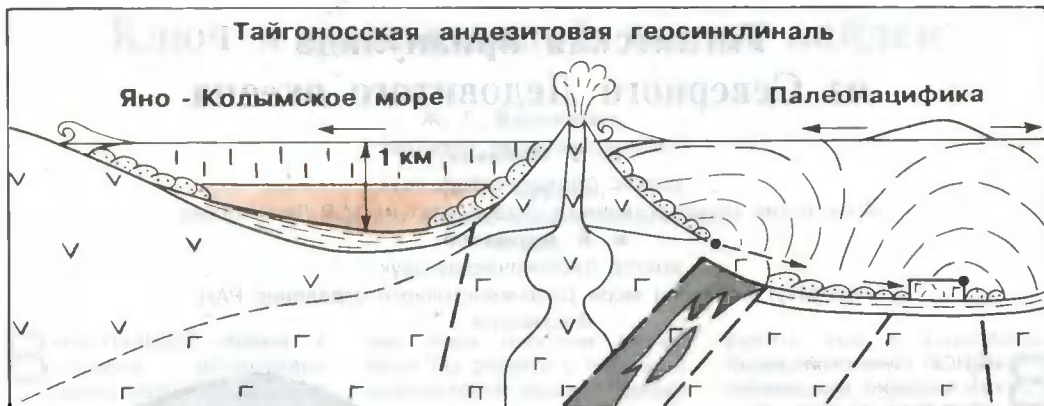
Палеоцунами по ходу стремительного продвижения заливали приморские низменности и захватывали местный слабо окатанный мелкообломочный материал, который в толще «рябчиков» вместе с пляжной галькой играет ведущую роль. Истирание же дна бассейна подводными оползнями и волновые разрушения на берегах окраинного моря приводили к захвату материала еще слабо литифицированных алевроит-глинистых осадков и образованию характерных для атканской свиты сланцевых глыб, которые обычно присутствуют и в современных подводно-оползневых отложениях.

Итак, поскольку андезитовая вулканическая дуга в поздней перми выглядела лишь как редкая цепь островов, то волна палеоцунами высотой до 100 м и более, проходя широким фронтом между ними, а иногда и перехлестывая

<sup>4</sup> Колясников Ю.А. // Вулканология и сейсмология 1994. № 1. С.85–87.

<sup>5</sup> Шмидт О.А. Тектоника Командорских островов и структура Алеутской дуги. М., 1978.

<sup>6</sup> Шепард Ф.П. Морская геология. Л., 1976.



- Сейсмоактивная зона
- Цунами
- Ударные волны
- Подводные оползни
- Толща «рябчиков»

- Осадочно - вулканогенные и плутонические породы: средние
- основные
- Магматическая колонна
- Сползающий блок офиолитов
- Разломы

*Схематический разрез Тайгоносской андезитовой геосинклинали и окраинных морей. Стрелками показано распространение волн цунами, пунктирная линия — предполагаемая граница континентальной и океанической коры.*

через них, прокатывалась по всему верхнепермскому морю со скоростью до ~700 км/ч. На своем пути она смывала пляжный, более грубый и окатанный, материал, а также дресву с заливавшихся ею приморских равнин, взмучивая и перемешивая всю водную массу со спровоцированными многочисленными потоками гравититов. С еще большим эффектом действовали и ударные волны...

По данным палеовулканологов (см. сноску 3), палеозойско-мезозойская Тайгоносская андезитовая геосинклинали

функционировала достаточно длительное время, но максимум ее вулканической активности приходился как раз на позднюю пермь. По-видимому срывы крупных офиолитовых пластин в направлении современного Тихого океана происходили последовательно практически по всей длине островной дуги. Постепенно эти срывы затухали к концу перми и неизбежно сопровождались сериями разрушительных палеоцунами и опережающих гидравлических ударов. Для собственно атканской свиты время накопления материала в данной интерпретации могло быть геологически очень малым.

Таким образом, учет палеоцунами и ударных волн для выяснения происхождения пермских «рябчиков» в бассейнах рек Яны и Колымы позволяет, во-первых, объединить имеющиеся на этот счет точки зрения (за исклю-

чением разве что тектонической) во вполне логичный сценарий, а во-вторых, подойти к реалистической реконструкции событий, приведших к образованию таких толщ, без привлечения маловероятных (например, падение в бассейн крупного метеорита) или второстепенных (ледовый разнос) факторов.

Что касается предполагаемой золотоносности «рябчиков», то атканская и подстилающая ее таская свиты по многим признакам отвечают черносланцевым формациям, обогащенным благородными металлами<sup>7</sup>, которые маркируют все значительные рубежи фанерозоя, в том числе границу нижней и верхней перми.

<sup>7</sup> Неручев С.Г. Центры происхождения культурных растений и радиоактивность среды // Природа. 1992. № 11. С.15—21.

# Гигантская приапулида из Северного Ледовитого океана

**В. В. Малахов,**

доктор биологических наук

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

**А. В. Адрианов,**

доктор биологических наук

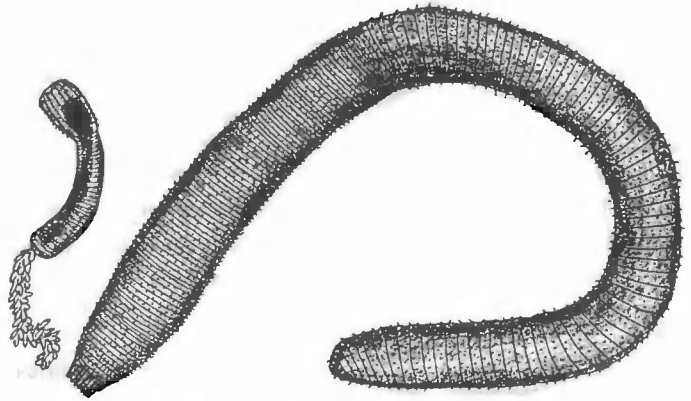
Институт биологии моря Дальневосточного отделения РАН

Владивосток

**В**ОДНОЙ чукотской сказке<sup>1</sup> жестокий муж решил избавиться от жены так, чтобы от нее не осталось никаких следов. Он набрал на берегу моря больших червей, поселил их в доме и каждый раз, возвращаясь с охоты, отдавал им целую нерпу. Черви ели, росли и «совсем большие стали». В конце сказки, как и положено, торжествует справедливость: выросшие черви однажды набросились на мужа и съели его живьем.

Мы вспомнили об этой сказке, когда в печати появилось сообщение о новом виде приапулид — *Halicryptus higginsi*<sup>2</sup>. Приапулиды — класс животного царства, входящий в состав типа головохоботных червей<sup>3</sup>. Они ведут роющий образ жизни в толще морского грунта и встречаются от приливо-отливной зоны до глубины 6 тыс. м. Приапулиды — реликтовая группа животных, представители которой были многочисленны в среднем кембрии (около 550 млн лет назад).

Долгое время науке были известны только четыре вида крупных приапулид, максимальные размеры которых достигают 10–15 см. В их число входят и ближайшие родственники нового вида — обычные у берегов Европы (в



том числе и у берегов России) приапулиды *Priapulid caudatus* и *Halicryptus spinulosus*. Первый вид сочетает хищничество с поеданием разлагающихся органических остатков, а второй — хищник, нападающий на живущих в грунте морских беспозвоночных.

В последние годы были открыты многочисленные микроскопические формы с длиной тела не более 1–2 мм. Они так малы, что могут жить в промежутках между частицами морского грунта. Именно за счет таких мелких форм число видов в классе возросло до 17.

Тем удивительнее оказалась находка у северного побережья Аляски упомянутого нового вида приапулид. Длина тела *H. higginsi* — около 40 см. Это самый крупный представитель головохоботных червей как среди современных, так и ископаемых форм. Новая приапулида названа в честь американского зоолога Р. Хиггинса, долгое время работавшего в Музее естественной истории в г. Вашингтоне (США) и описавшего много видов головохоботных червей.

*Гигантская приапулида Halicryptus higginsi* (справа) и обычный у берегов Европы представитель этого класса — *Priapulid caudatus*.

Можно предположить, что коренные жители Чукотки и Аляски иногда находили этих крупных желтовато-бурых червей на берегу после сильных штормов. Внешний вид червей с вывернутой глоткой, несущей большие крючковатые зубы, вдохновил безымянных авторов на создание фольклорного триллера.

Поскольку новый вид известен из выбросов, судить о его образе жизни мы можем только по аналогии с европейским родственником. Вероятно, он обитает в заиленном морском грунте и так же, как европейский представитель того же рода, охотится на живущих в грунте беспозвоночных. Даже сильные шторма редко размывают грунт на глубинах больше 10–15 м, поэтому новый вид скорее всего принадлежит к мелководной фауне.

© В. В. Малахов, А. В. Адрианов

<sup>1</sup> Сказки и мифы народов Чукотки и Камчатки. М., 1974.

<sup>2</sup> Storch V. // Biologie in unserer Zeit. 1996. Jahrg. 26. № 6. S. 356–372.

<sup>3</sup> Малахов В. В., Адрианов А. В. Цефалоринхи — новый тип животного царства // Природа. 1997. № 3. С. 3–17.

# Ключ к межзвездной химии найден

Ж. Г. Василенко,  
кандидат химических наук

В. Г. Сурдин,  
кандидат физико-математических наук  
Москва

**В** НАСТОЯЩЕЕ время в космосе обнаружено около сотни самых разнообразных молекул и молекулярных ионов. Представление о возможном богатстве химических процессов и продуктов химических реакций в межзвездном пространстве дает публикуемая таблица. В ней приведены только формулы молекул, найденных в плотных межзвездных облаках. В диффузных облаках обнаружены лишь простейшие молекулы ( $H_2S$ , HD, OH, NH, C, CO, CN, CS). Не показаны также соединения, открытые в расширяющихся оболочках красных гигантов.

Поражает не только разнообразие молекул и их длина (до 13 атомов в молекуле), но и присутствие как малостабильных молекул, так и радикалов и ионов, неустойчивых в обычных для Земли условиях. В космосе их стабильность связана с высокой разреженностью межзвездных облаков. Эти «неземные» образования появляются как короткоживущие промежуточные продукты в реакциях, имеющих важное научное или технологическое значение. «Отловить» такие частицы и оценить их концентрации для выяснения хода того или иного процесса — достаточно сложная экспериментальная задача. Часть возникающих

при этом проблем можно было бы решить с помощью межзвездной химии. Однако конкретные механизмы образования молекул в межзвездных облаках до сих пор не ясны. Особые сложности возникают при объяснении начальных этапов этого процесса.

По современным представлениям, ключевую роль в низкотемпературной газовой химии межзвездных облаков играет молекулярный ион  $H_3^+$ . Предполагается, что именно он инициирует ионмолекулярные реакции, в ходе которых синтезируются достаточно сложные структуры. С изменением концентрации  $H_3^+$  связана также кинетика охлаждения и сжатия облаков, определяющая процесс формирования звезд.

Проблема обнаружения иона  $H_3^+$  в межзвездной среде и измерения его концентрации волнует астрофизиков уже не одно десятилетие. Впервые предположение о присутствии иона  $H_3^+$  в межзвездных средах было высказано в 1961 г. более тридцати лет назад Д.В.Мартин<sup>1</sup> и др.

В 1980 г. ион был выделен в лабораторных условиях в количествах, достаточных для описания с высокой точностью его ИК-спектра испускания. Это позволило астрономам обна-

ружить ион в атмосферах больших планет Солнечной системы и указать на возможное его присутствие в выбросах сверхновой 1987А. Однако малое содержание иона в межзвездных облаках и, как следствие, слабость фиксируемых спектральных линий оставляли вопрос о величинах его концентраций в космосе открытым.

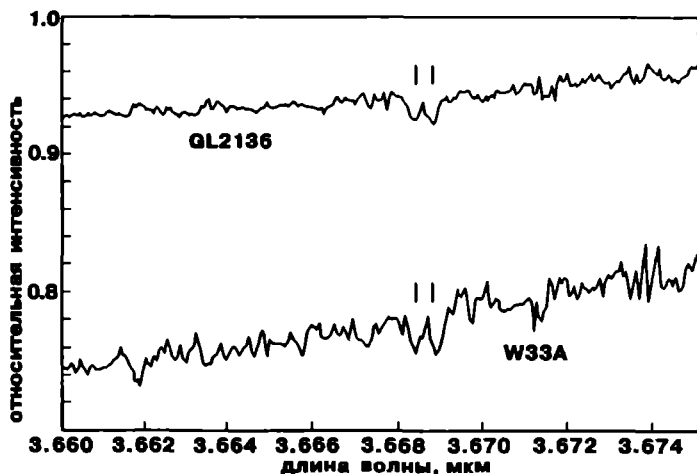
Недавно Т.Р.Жебал (Т.Р.Geballe, Объединенный астрономический институт, Хило, Гавайи) и Т.Ока (Т.Ока; Институт Э.Ферми, Чикагский университет, США), работая на инфракрасном телескопе UKIRT на Гавайях, наблюдали молекулярные облака, которые располагаются на пути распространения света от молодых звезд GL2136 и W33A, являющихся яркими источниками ИК-континуума. Им удалось зафиксировать характеристические линии поглощения  $H_3^+$  и после некоторых попыток с неплохой точностью определить параметры трех колебательно-вращательных переходов вблизи длины волны 3.7 мкм.

Характерная особенность спектра поглощения  $H_3^+$  в этом диапазоне — наличие близкого дублета с длинами волн 3.6681 и 3.6685 мкм.

Спектры, полученные в наблюдениях 15 июля 1996 г., приведены на рисунке, где хорошо видны линии орто-пара дублета

<sup>1</sup> *Astrophys. J.* 1961. V.134. P.1012—1014.

Участок спектра звезд GL2136 и W33A вблизи орто-пара дублета иона  $H_3^+$ . Линии поглощения отмечены вертикальными отрезками. Относительная интенсивность спектра звезды W33A увеличена в 7.5 раза.

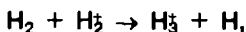


спектра поглощения иона  $H_3^+$  в облаках, прикрывающих звезды. Анализ линий позволил определить значения поверхностных плотностей иона  $H_3^+$ , составившие для звезд GL2136 и W33A соответственно:

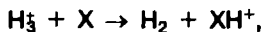
$(4.0 \pm 0.9) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $(6.0 \pm 2.3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , а также, с использованием известных данных, найти величины отношений концентраций  $H_3^+$  и основного компонента межзвездных облаков  $H_2$ . Величины  $[H_3^+]/[H_2]$  оценены в  $2.2 \cdot 10^{-9}$  и  $2.1 \cdot 10^{-9}$ .

Прямые наблюдения иона  $H_3^+$  в межзвездных молекулярных облаках — путь к определению некоторых фундаментальных космических характеристик и кинетических параметров земных химических процессов.

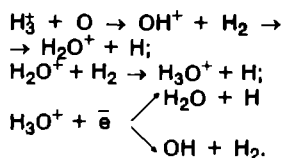
Особенности химии межзвездных облаков связаны с тем, что химические процессы при температурах около 10К заторможены. Однако ионизация различных частиц под действием космических лучей кардинально меняет химию этих газов. Так, ионизация  $H_2$  приводит к образованию  $H_3^+$  по схеме:



причем скорость образования  $H_3^+$  равна  $\xi[H_2]$ , где  $\xi$  — коэффициент ионизации молекул космическими лучами. Особая роль иона  $H_3^+$  обусловлена тем фактом, что новые молекулы возникают в процессах, стартующих с одного исходного — реакции переноса протона:



причем X здесь — любое соединение с большим сродством к протону, чем у  $H_2$ , но это и характерно для большинства молекул и атомов. Например, нижеследующая цепочка последовательных реакций завершается образованием воды  $H_2O$  и гидроксила OH:



Отметим, что вероятность протекания реакции рекомбинации  $H_3O^+$  с электроном по той или иной ветви установлена пока

приблизненно. Доля появляющихся молекул  $H_2O$  лежит в интервале 5—33%. Большинство сложных молекул образуется в космосе в цепи превращений, похожих на приведенную. Одновременное измерение концентраций  $H_3^+$  и OH в межзвездных облаках позволило бы уточнить важные для химии константы скоростей процессов образования воды и гидроксила.

Возможность количественной оценки, имеющей, как предполагается, универсальное значение величины  $\xi$ , определяется тем, что протекающая в межзвездных облаках реакция с переносом протона от  $H_3^+$  к CO (наиболее распространенный вслед за  $H_2$  компонент облаков) имеет значительно большую константу скорости ( $k$ ), чем аналогичные реакции с участием атомов кислорода или других нейтральных молекул. Если пренебречь уменьшением количества  $H_3^+$  за счет процесса его рекомбинации со свободным электроном (а относительная концентрация электронов меньше  $10^{-8}$ ), то условие, определяющее концентрацию  $H_3^+$ , запишется в виде:

## Межзвездные молекулы

Формула	Название	Спектральный диапазон	Год открытия
<b>2-атомные</b>			
CH	Метилидин	Оптический	1937
CN	Циан	Оптический	1940
CH <sup>+</sup>	Метилидин (ион)	Оптический	1941
OH	Гидроксил	Радио 18 см	1963
CO	Моноксид углерода	Радио 2.6 мм	1970
H <sub>2</sub>	Молекулярный водород	УФ	1970
CS	Сероуглерод	Радио 2.0 мм	1971
SiO	Моноксид кремния	Радио 2.3 мм	1971
SO	Моноксид серы	Радио 3.0 мм	1973
NS	Сульфид азота	Радио 2.6 мм	1975
SiS	Сульфид кремния	Радио 2.8 мм	1975
C <sub>2</sub>	Двуатомный углерод	ИК	1977
NO	Оксид азота	Радио 2.0 мм	1978
HCl	Хлористый водород	ИК	1985
<b>3-атомные</b>			
H <sub>2</sub> O	Водяной пар	Радио 1.4 см	1968
HCO <sup>+</sup>	Формил (ион, радикал)	Радио 3.4 мм	1970
HCN	Цианистый водород	Радио 3.4 мм	1970
HNC	Изоцианистый водород	Радио 3.3 мм	1971
OCS	Карбонилсульфид	Радио 2.7 мм	1971
H <sub>2</sub> S	Сероводород	Радио 1.8 мм	1972
C <sub>2</sub> H	Этинил (радикал)	Радио 3.4 мм	1974
N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	Диазонил	Радио 3.2 мм	1974
HCO	Формил (радикал)	Радио 3.5 мм	1975
SO <sub>2</sub>	Диоксид серы	Радио 3.6 мм	1975
HNO	Нитроксил	Радио 3.7 мм	1977
HCS <sup>+</sup>	Тиоформил	Радио 3 мм	1980
O <sub>3</sub>	Озон	Радио 1.5 мм	1980
SiC <sub>2</sub>	Карбид кремния	Радио 1—3 мм	1984
H <sub>2</sub> D <sup>+</sup>	Дейтерированный водород	Радио 0.8 мм	1985
SiH <sub>2</sub>	Силинил	Радио	1990
H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	Без названия	ИК 3.7 мкм	1996
<b>4-атомные</b>			
NH <sub>3</sub>	Аммиак	Радио 1.3 см	1968
H <sub>2</sub> CO	Формальдегид	Радио 6.2 см	1969
HNCO	Изоциановая кислота	Радио 3.4 мм	1971
H <sub>2</sub> CS	Тиоформальдегид	Радио 9.5 см	1971
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Ацетилен	ИК	1976
C <sub>3</sub> N	Карбонитрил (цианоэтинил)	Радио 3.4 мм	1976
HNCS	Роданистоводородная кислота	Радио 3 мм	1979
HOCO <sup>+</sup>	Протонизированный диоксид углерода	Радио 3 мм	1980
HCNH <sup>+</sup>	Протонизированный цианистый водород	Радио 2—3 мм	1984
C <sub>3</sub> H	Пропонил (радикал)	Радио 3 мм	1984
C <sub>3</sub> O	Моноксид триуглерода	Радио 1.7 см	1984
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	Гидроксоний		1986
C <sub>3</sub> S	Сульфид триуглерода		1986
HCCN	(Без названия)	Радио	1991
<b>5-атомные</b>			
HCOOH	Муравьиная кислота	Радио 18 см	1970
HC <sub>3</sub> N	Цианоацетилен	Радио 3.3 см	1970
CH <sub>2</sub> NH	Метанимин	Радио 5.7 см	1972
NH <sub>2</sub> CN	Цианамид	Радио 3.7 мм	1975
CH <sub>2</sub> CO	Кетен	Радио 2.9 мм	1976
C <sub>4</sub> H	Бутадиинил (радикал)	Радио 2.6 мм	1978
SiH <sub>4</sub>	Силан	ИК	1984
C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	Циклопропенилидин (радикал)	Радио 2 см	1985

Окончание таблицы

Формула	Название	Спектральный диапазон	Год открытия
CH <sub>2</sub> CN	Цианометил (радикал)	Радио	1987
C <sub>4</sub> Si	(Без названия)	Радио	1989
H <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	Пропадиэнилидин	Радио	1990
<b>6-атомные</b>			
CH <sub>3</sub> OH	Метанол (древесный спирт)	Радио 36 см	1970
CH <sub>3</sub> CN	Метилциан	Радио 2.7 мм	1971
NH <sub>2</sub> CHO	Формамид	Радио 6.5 см	1971
CH <sub>3</sub> SH	Метилмеркаптан	Радио 3.0 мм	1979
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Этилен	ИК	1980
C <sub>5</sub> H	Пентадинил (радикал)	Радио 3 мм	1986
CH <sub>3</sub> NC	Метилизоцианид	Радио	1987
HCCCHO	Пропиналь	Радио	1989
H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	Бутатриэнилидин	Радио	1990
<b>7-атомные</b>			
CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	Метилацетилен	Радио 3.5 мм	1971
CH <sub>3</sub> CHO	Ацетальдегид	Радио 28 см	1971
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	Метиламин	Радио 3.5 мм	1974
CH <sub>2</sub> CHCN	Акрилонитрил (винилцианид)	Радио 22 см	1975
HC <sub>5</sub> N	Цианодиацетилен	Радио 3.0 см	1976
C <sub>6</sub> H	Гексатринил	Радио 22 см	1986
<b>8-атомные</b>			
HCOOCH <sub>3</sub>	Метилформиат	Радио 18 см	1975
CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	Метилцианоацетилен	Радио 1.5 см	1983
<b>9-атомные</b>			
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	Этиловый (винный) спирт	Радио 2.9 мм	1974
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	Диметиловый эфир	Радио 9.6 мм	1974
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CN	Пропазонитрил (этилцианид)	Радио 3 мм	1977
HC <sub>7</sub> N	Цианотриацетилен	Радио 2.9 см	1977
CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	Метилдиацетилен	Радио 1.5 см	1984
<b>10-атомные</b>			
NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH	Глицин		
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	Ацетон		1987
<b>11-атомные</b>			
HC <sub>9</sub> N	Цианооктатетрен	Радио 2.9 см	1977
<b>13-атомные</b>			
HC <sub>11</sub> N	Цианодекапентан	Радио 1.3 см	1981

$$\xi[\text{H}_2] = k[\text{H}\dot{\text{C}}] \cdot [\text{CO}] \text{ или } \xi = k(N(\text{H}\dot{\text{C}})/L) \cdot \{[\text{CO}]/[\text{H}_2]\},$$

где  $L$  — эффективная толщина звездного облака в направлении источника излучения инфракрасных лучей.

Что известно на сегодня? Константа скорости  $k = 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ; отношение

$[\text{CO}]/[\text{H}_2] \approx 1.5 \cdot 10^{-4}$ , практически одинаковое в широком диапазоне космических условий; полученные ныне величины поверхностных плотностей  $\text{H}\dot{\text{C}}$  для двух облаков.

Оценка значения  $\xi$  по результатам измерения диффузии  $\gamma$ -квантов, появ-

ляющихся в облаках за счет тех же космических лучей, которые вызывают ионизацию этих облаков, дают лишь порядок величины  $\xi \approx 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ , тогда как все найденные в этом исследовании величины позволяют определить  $\xi$  с точностью, недоступной косвенным методам.



# СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СЕГОДНЯ

Памяти академика Б.К.Вайнштейна



*Академик Б.К.Вайнштейн  
10.07.1921 — 28.10.1996*

Год назад друзья, коллеги, ученики поздравляли академика Бориса Константиновича Вайнштейна с 75-летием. Следующий день рождения юбиляру отметить было не суждено. Окончился путь человека широкого круга интересов, ученого энциклопедической образованности. Но не ставится точка в том деле, которому он, один из создателей структурного анализа в его современной форме, посвятил свою жизнь. Теперь Вайнштейн стал для нас Классиком.

Научная деятельность Вайнштейна неразрывно связана со становлением и развитием Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Выпускником физфака МГУ пришел он в 1945 г. в аспирантуру института (организованного в 1943 г.), а в 1962 г. его возглавил и оставался на посту директора до конца жизни. Институт за это время превратился в признанный центр по изучению роста, структуры и свойств кристаллов.

Кристаллы совершенством своих форм, игрой света притягивали человека с незапамятных времен. Кристаллография уходит корнями в глубокую древность — она начиналась с описания драгоценных камней. Став самостоятельной наукой в середине XVIII в., она развивалась, устанавливая закономерности огранки и постигая симметрию кристаллов. Полностью классическую теорию симметрии кристаллов сформулировал в 1890 г. Е.С.Федоров, который вывел все возможные 230 пространственных групп симметрии. Открытие в 1912 г. М.Лауэ, В.Фридрихом, П.Книппингом дифракции рентгеновских лучей, с одной стороны, стало доказательством периодического строения кристаллов, а с другой — дало в руки ученых мощный метод исследования структуры. Рентгеноструктурный анализ, дополненный затем электроно- и нейтронографией, стал основой изучения законов взаимного расположения атомов в кристаллах. И не только в них — круг исследуемых объектов расширился до тонких пленок, до неупорядоченных систем — жидкостей, аморфных тел. Расширилось и само понятие «кристаллы». Когда-то включавшее в себя только минералы правильной огранки, теперь оно охватывает широкий класс как природных, так и искусственных кристаллов — вплоть до жидких кристаллов и кристаллов из биологических молекул.

И практически во всех областях кристаллографии работы Вайнштейна оставили заметный след — от решения общих вопросов структурного анализа и создания метода электронографии до трехмерной реконструкции изображения в электронной микроскопии и определения структуры биологических объектов. В предлагаемой подборке речь пойдет лишь о некоторых направлениях исследований, которые Вайнштейн инициировал и развивал. Надеемся, что это даст читателю хоть какое-то представление о разнообразии научных интересов и плодотворности идей этого замечательного ученого. В дальнейшем мы рассчитываем продолжить рассказ о проблемах, пути решения которых он наметил.

# Дифракция электронов как метод изучения структуры

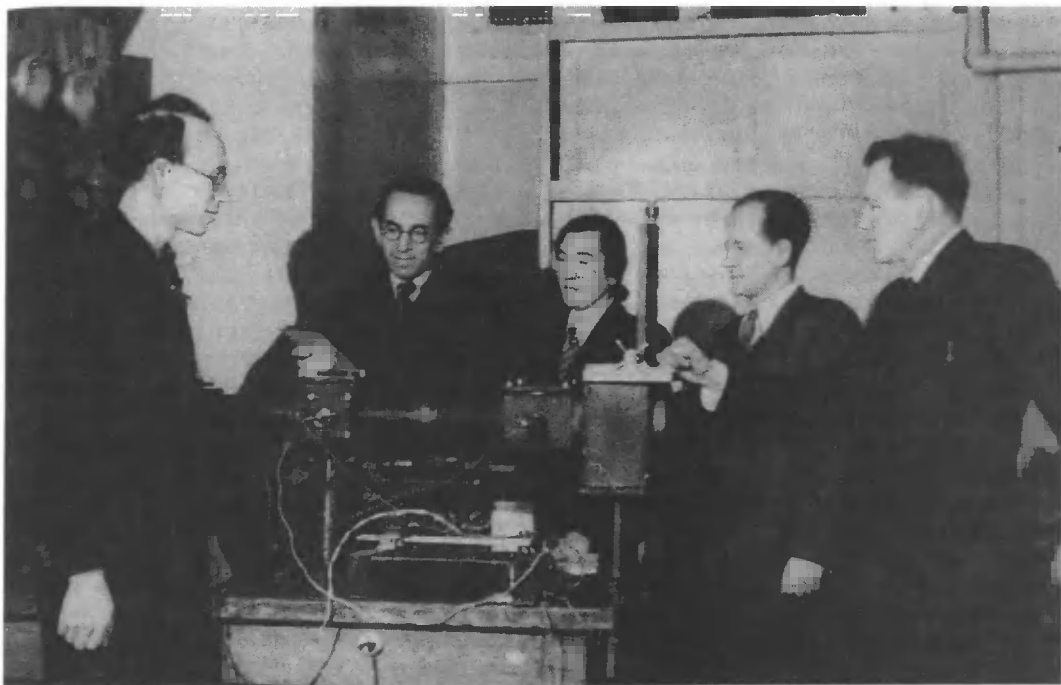
В. В. Клечковская



*Вера Всеволодовна Клечковская, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией электронографии Института кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН. Область научных интересов — электронографический структурный анализ тонких неорганических и органических пленок. В июне этого года защитила докторскую диссертацию.*

**Д**ИФРАКЦИЯ электронов была открыта К.Дэвиссоном и Л.Джержермом семьдесят лет назад, и огромное число работ в этой области, выполненных с тех пор, закрепило за этим явлением репутацию важного инструмента для структурных исследований. В ряде случаев дифракция электронов — единственный, ничем не заменимый метод.

Чтобы наблюдать дифракцию волн любой природы, длина волны  $\lambda$  должна быть соизмерима с расстоянием между рассеивающими центрами  $d$ :  $\lambda \leq d$ . Для электронов, ускоренных полем  $U=10-100$  кВ, длина волны де Бройля  $\lambda=0.12-0.04$  Å, что на два порядка меньше средних межатомных расстояний в кристалле. Это позволяет использовать электроны таких энергий для зондирования структуры кристаллов наряду с рентгеновскими лучами и нейтронами. В основе образования любых дифракционных картин лежит усиление когерентно рассеянного излучения по одним направлениям и ослабление — по другим. В получаемой дифрактограмме (с экспериментальной точки зрения — зависимости интенсивности рассеянного излучения от направления) заключена информация о взаимном расположении рассеивающих центров и даже об их «внутреннем устройстве». Теоретический аппарат, описывающий дифракцию рентгеновских лучей, нейтронов и электронов, во многом схож. Различия заложены в механизме взаимодействия излучения с отдельным атомом. Рентгеновские лучи рассеиваются электронами атома, нейтроны — его ядром, а электроны — под действием электрического поля атома. И то «внутреннее



*Рис. 1. Коллектив лаборатории электронографии (1947) у прототипа первого серийного электронографа. Слева направо: Б.К.Вайнштейн, З.Г.Пинскер, Л.И.Татарикова, Г.И.Дистлер, И.И.Ямзин.*

устройство» рассеивающего центра, которое выявляется дифракцией в конкретном случае, — это распределение в пространстве электронной плотности, ядерной плотности и электростатического потенциала, соответственно. Получив после специальной обработки дифракционных данных такие пространственные карты плотности всего объекта, можно найти положение атомов: они локализованы в местах максимальной плотности.

Специфика метода электронной дифракции в том, что электроны взаимодействуют с веществом намного сильнее, чем рентгеновские лучи (энергия взаимодействия больше в  $10^6$  раз!) и, тем более, нейтроны. По этой причине дифракцию электронов удается наблюдать для очень тонких слоев — в десятки и сотни ангстрем, тогда как для рентгеновского и нейтронного анализа образцы должны быть гораздо

более массивными (толщиной порядка миллиметров).

До сих пор этот метод остается главным при изучении структуры тонких органических и неорганических пленок и приповерхностных областей кристаллов<sup>1</sup>.

#### ОТ ЭКЗОТИЧЕСКИХ КАРТИНОК К ТОЧНОЙ МЕТОДИКЕ

На первых порах электронно-дифракционный анализ был качественным: ограничивался показом картин дифракции от объектов, для которых рентгеновский метод был малоэффективен. В 1947 г. в Институте кристаллографии Академии наук СССР под руководством З.Г.Пинскера была создана лаборатория электронографии, в число пяти сотрудников которой вошел и аспирант Б.К.Вайнштейн, обладавший большими аналитическими способнос-

<sup>1</sup> О новых возможностях метода дифракции рентгеновских лучей, связанных с использованием синхротронного излучения, см.: Ковальчук М.В., Желудева С.И., Носик В.Л. Рентгеновские лучи — от объема к поверхности // Природа. 1997. № 2. С.54—69.

тиями и превосходной подготовкой по физике. На рис.1 мы видим в окружении стартового коллектива лабораторный прототип первого отечественного серийного электронографа ЭГ-1, завоевавшего в конце 50-х годов признание и высокую оценку на международной выставке в Брюсселе. Результаты электронографических работ сводились пока к первым шагам в геометрической теории электронограмм и выполнению небольшой серии экспериментальных структурных определений<sup>2</sup>.

Перед молодым аспирантом была поставлена задача — дальнейшая разработка метода структурной электронографии с целью превращения его в количественный. Начав с исследования структуры пленок  $\text{BaCl}_2$ , он вскоре сформулировал замечательную и важную идею, реализация которой обеспечила переход электронографии на существенно более высокий уровень. Речь идет о представлении пространственного распределения электростатического потенциала кристалла в виде ряда Фурье по амплитудам рассеяния одной элементарной ячейкой. Плодотворность этого подхода убедительно выявилась в последующие годы. Меньше чем за 10 лет были развиты: геометрическая теория электронограмм и методика определения по ним типа и параметров элементарной ячейки, теория интенсивностей отражений (в том числе и для мозаичных кристаллов) и теория рядов Фурье-потенциала в применении их к электронографии, позволяющие устанавливать положения атомов в ячейке. Сопоставляя природу рассеивающей способности вещества для электронов, рентгеновских лучей и нейтронов, Вайнштейн совместно с американским ученым Дж.Айберсом составил таблицы атомных амплитуд рассеяния электронов для всех элементов. Особо следует отметить доказательство преимущества дифракции электронов при определении положений легких атомов

в присутствии тяжелых. Обобщением этих работ стала книга Вайнштейна «Структурная электронография»<sup>3</sup>, вышедшая из печати в 1956 г.

Таким образом, Вайнштейна по праву можно назвать родоначальником электронографического структурного анализа вещества (современным языком — структурной электронной кристаллографии), который был построен им фактически с нуля. С конца 50-х этот анализ не только полностью определился как один из независимых дифракционных методов исследования кристаллической структуры, теоретически обоснованный и разработанный практически, но и обрел окончательно свои специфические черты и свою область применения.

На этом крепком фундаменте было выполнено большое число структурных исследований тонких пленок самых разных соединений, зачастую с совершенно неизвестной ранее структурой<sup>4</sup>. Электронографический анализ быстро перешагнул за рамки лаборатории электронографии. Родилась советская школа электронографии, центры которой создавались, как правило, воспитанниками лаборатории по всей нашей некогда необъятной стране (Баку, Ереван, Харьков, Киев, Казань, Махачкала и т.д.); возникли подобные группы и в некоторых других странах.

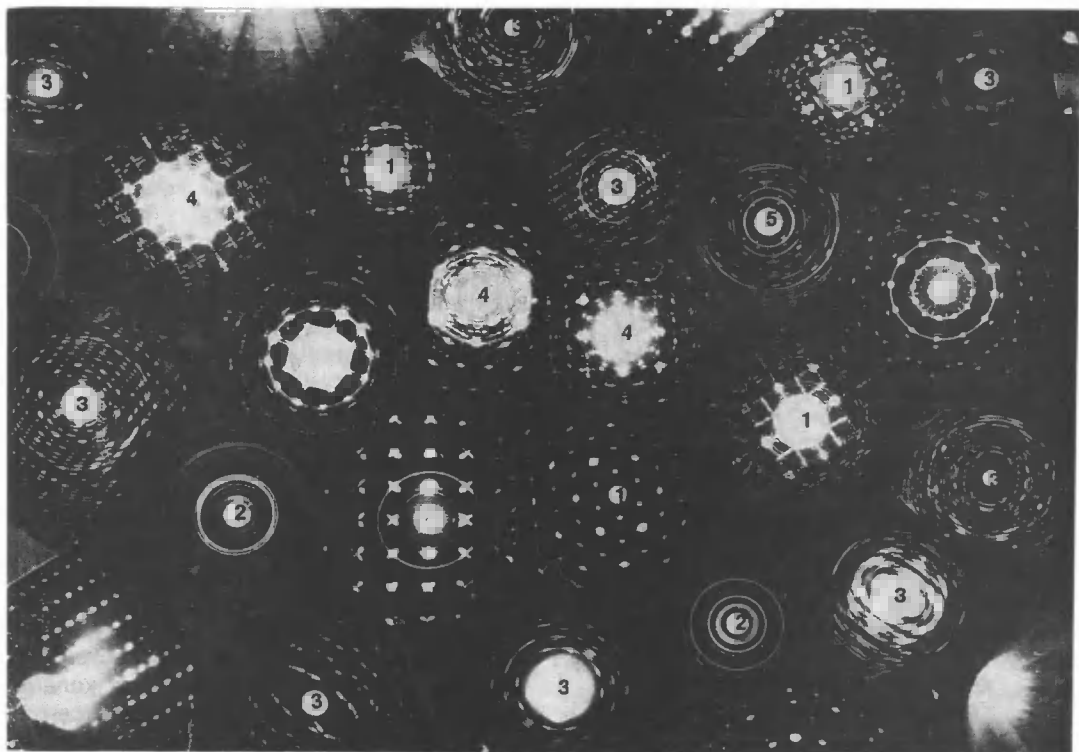
#### БОЛЬШИЕ ЭНЕРГИИ — БОЛЬШИЕ ПРОБЛЕМЫ

Хотя и по сей день кристаллические структуры расшифровываются главным образом при помощи рентгеноструктурного анализа, высокодисперсные и тонкопленочные материалы, столь важные для современной техники и микроэлектроники, могут быть изучены только методом дифракции электронов высоких энергий. Однако большая энергия взаимодействия электронов с веществом, дающая такую возможность,

<sup>3</sup> Вайнштейн Б.К. Структурная электронография. М., 1956.

<sup>4</sup> Пинскер З.Г., Звягин Б.Б., Имамов Р.М. // Кристаллография. 1981. Т.26. С.1181—1190.

<sup>2</sup> Пинскер З.Г. Дифракция электронов. М.; Л., 1949.



*Рис. 2. Различные виды электронограмм: 1 — от мозаичного монокристалла; 2 — от поликристаллической пленки; 3 — от ориентированного поликристалла (текстуры); 4 — с «динамическим зажиганием» рефлексов; 5 — от нескольких фаз одновременно.*

несет в себе и опасность. Дело в том, что определение структуры базируется на так называемом кинематическом приближении рассеяния, относительно простые формулы которого позволяют это определение проводить. В кинематической теории, во-первых, пренебрегают потерей энергии первичного пучка по мере «расходования» на образование когерентно рассеянного излучения и, во-вторых, не учитывают когерентное рассеяние вторичных пучков, которые могли бы порождать в свою очередь новые дифрагированные пучки, будучи для них «первичными», и т.д. Если ситуация выходит за рамки этих приближений, то говорят, что дифракция носит динамический характер. Для электронов это вполне вероятно, и вопрос о физи-

ческих основах электронографии (возможном вкладе динамических эффектов при дифракции) до сих пор остается предметом дискуссий.

В связи с этим было специально проведено сравнение электронографических структурных данных с рентгеновскими, и было показано хорошее соответствие геометрии решетки и параметров расположения атомов, найденных двумя методами. При этом изучение соединений из легких и тяжелых элементов позволило в структурах, определенных ранее рентгеновским методом, локализовать легкие атомы, включая атомы водорода.

Обширный экспериментальный материал, накопленный на протяжении многих лет в процессе электронографических структурных исследований, говорит о применимости кинематической теории для расчета интенсивностей отражений на электронограммах, которые получены при энергии электронов 50—75 кэВ (иногда до 400 кэВ) и толщинах пленок 100—600 Å. Одна-

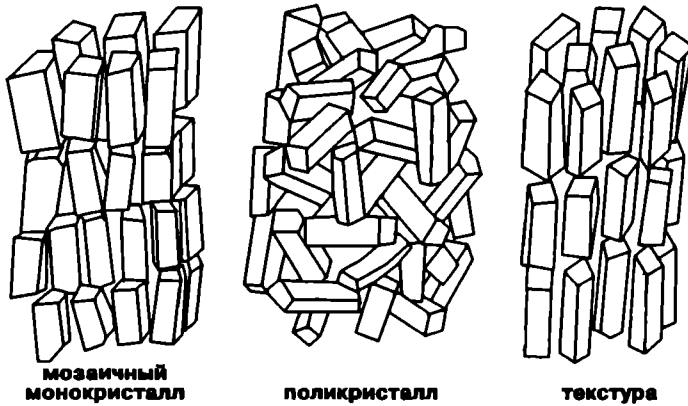


Рис. 3. Расположение упорядоченных кристаллитов в пленках различного типа.

ко в некоторых случаях (на этапе уточнения структуры) динамическая теория рассеяния при необходимости используется в виде сравнительно простых приближений — вводятся поправки на поглощение и расчет ведется в двухволновом приближении.

#### КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ ГЛАЗАМИ ЭЛЕКТРОНОГРАФИСТА

Картины электронной дифракции завораживают своим разнообразием (рис.2). Однако для проведения полного структурного анализа пригодны электронограммы трех основных типов, реализующихся в зависимости от степени совершенства взаимной укладки кристаллитов (рис.3).

Первый тип — точечные электронограммы от так называемых мозаичных монокристалльных пленок — пленок, кристаллиты в которых сохраняют свою ориентацию в пределах  $1-2^\circ$ . Каждый рефлекс здесь — результат отражения от некоторой системы параллельных атомных плоскостей. Такие рефлексы называются брэгговскими, поскольку их положение задается условием Брэгга—Вульфа:  $n\lambda = 2d \sin \theta$  ( $2\theta$  — угол рассеяния, т.е. угол между направлениями падающего и рассеянного пучков, а  $d$  — расстояние между рассеивающими атомными плоскостями). На таких электронограммах обычно одновременно присутствуют несколько порядков отражений от одной системы плоскостей (соответствующих

разным значениям целого числа  $n$ ).

Второй тип — кольцевые электронограммы от поликристаллических объектов, в которых кристаллики расположены совершенно беспорядочно друг относительно друга. Из-за этой хаотичности ориентаций отражающих плоскостей точечные рефлексы смыкаются в кольца, однако радиусы колец однозначно связаны с межплоскостными расстояниями.

И, наконец, третий — электронограммы от текстурированных пленок, в которых кристаллики располагаются одной и той же гранью параллельно подложке, но беспорядочно по азимуту. Эти пленки дают резко различающиеся по своему виду дифракционные картины в зависимости от взаимной ориентации оси текстуры и электронного пучка. При совпадении этих двух направлений получаем кольцевую электронограмму, из-за чего ее можно спутать с электронограммой от поликристалла. Специфический характер текстурированных пленок проявляется в изменении вида электронограмм, если съемку вести при наклоне образца по отношению к пучку электронов. «Косая» электронограмма содержит большое число отражений, образующих характерный рисунок, причем расположение рефлексов по эллипсам свойственно любым кристаллам.

По геометрии электронограмм каждого из перечисленных трех типов можно определить периоды элементарной ячейки и предполагаемую группу симметрии для изучаемого кристал-

ла. Измерив затем интенсивности рефлексов, можно приступать к собственно структурным расчетам. Заметим, что далеко не всегда от исследуемого объекта удается получить электронограммы одного из описанных типов. Значительная часть электронограмм от изучаемых кристаллических пленок имеет ряд особенностей: размытие максимумов, появление дополнительных или сверхструктурных рефлексов, образование дифракции от нескольких фаз одновременно, «динамическое загнивание» рефлексов (в толстых образцах; см. рис.2). Эти снимки непригодны для проведения полного структурного определения, но внимательное изучение таких дифракционных картин позволяет получить ценные сведения о фазовом составе, микроструктуре пленок, деформациях и т.п.

#### ЕСЛИ В КРИСТАЛЛЕ ПОРЯДОК НАРУШЕН

Тонкопленочные материалы обычно получают термическим напылением сплавов или их отдельных компонентов, напылением чистых металлов с последующей химической обработкой (гидрированием, азотированием, окислением), катодным распылением в реактивной среде и т.д. В результате образуются соединения с неизвестным составом (известен лишь возможный набор элементов, а их количественные соотношения — нет), причем часть атомов может занимать свои положения статистически (так называемые дефектные фазы). Тонкие пленки и поверхностные покрытия могут изменять состав и структуру при незначительных вариациях параметров эксперимента или во время эксплуатации. Метод электронографического структурного анализа в изучении такого рода процессов практически незаменим: хотя определение структуры значительно усложняется, трудности все

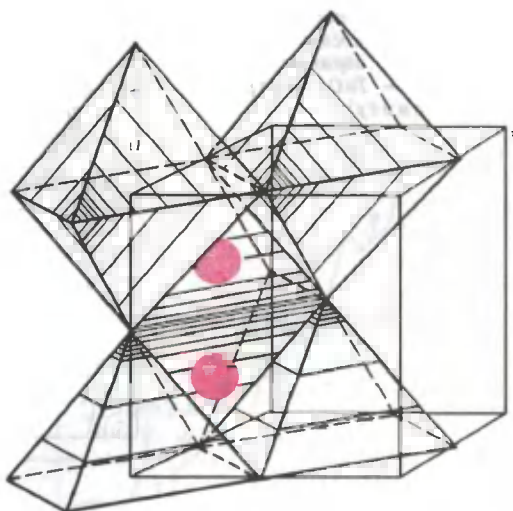


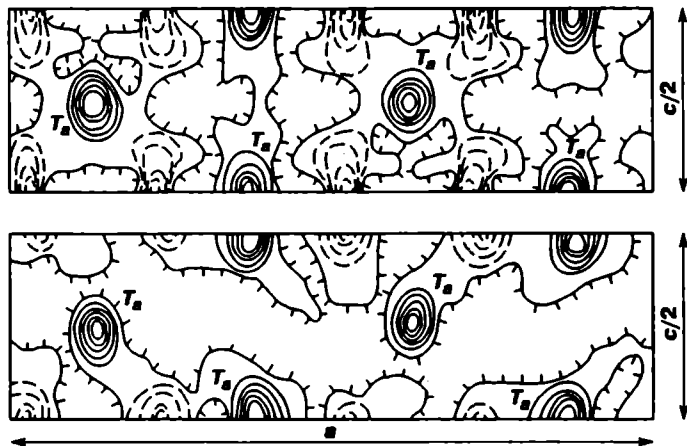
Рис. 4. Внедрение атомов кислорода (цветные шары) в тетраэдрические пустоты кубической решетки монооксида тантала.

же преодолимы<sup>5</sup>.

Рассмотрим только один пример из многочисленных работ по изучению оксидов переходных металлов. Детальный структурный анализ тонких слоев оксидов Ta, Nb, V, Zr и других переходных металлов позволял практически отслеживать перестройку кристаллической решетки при переходе одной окисной фазы в другую. Например, для тантала удалось наблюдать превращение монооксида тантала (кубическая решетка типа NaCl) в двуокись (тетрагональная решетка типа рутила). Изменения в решетке монооксида начинаются с перераспределения атомов кислорода между октаэдрическими и тетраэдрическими пустотами в подрешетке тантала (рис.4), которое сопровождается очень небольшим изменением объема элементарной ячейки. Это перераспределение облегчает последующую перестройку подрешетки металла, причем процесс идет постепенно и завершается после формирования нового строения подрешетки металла (соотношение количества атомов металла и кислорода пока не меняется). Дальнейшее окисление идет за счет заполнения атомами кислорода позиций в «новой» тетрагональной ячейке — вплоть до достижения состава  $TaO_2$ .

<sup>5</sup> Ключковская В.В., Удалова В.В. Определение атомной структуры кристаллов электронографическим методом // Методы структурного анализа. М., 1989. С.235—255.

Рис. 5. Распределение потенциала в плоскости ( $x \ 3/8 \ z$ ) для двух образцов оксида тантала —  $TaO_2$  (вверху) и  $TaO_{1.5}$  (внизу).



Подчеркнем, что на картинах дифракции последний этап сопровождается только изменением соотношений интенсивностей рефлексов, а геометрия электронограмм сохраняется. На рис.5 представлены распределения потенциала для двух образцов «двуокиси» состава  $TaO_2$  и  $TaO_{1.5}$ . Различия в высотах пиков потенциала свидетельствуют о том, что во втором случае атомы кислорода занимают свои позиции лишь наполовину. Видны также небольшие сдвиги атомов тантала, приводящие к укороченным, даже по сравнению с решеткой чистого металла, расстояниям Ме-Ме.

Итак, в пределах одной (с точки зрения геометрии электронограмм) фазы возможны значительные вариации состава и типа химической связи. По-видимому, это характерно не только для тонких пленок, но и для массивных поликристаллических образцов: неоднократно отмечалось, что свойства того же диоксида тантала в порошках могут необъяснимо изменяться от близких к металлическим до диэлектрических. Ясность в этот вопрос вносят проведенные электронографические структурные определения. Систематические нарушения кристаллической решетки, при которых атомы заселяют свои позиции с вероятностью меньше единицы, впервые были обнаружены именно методом электронографии, процессы перестройки

структуры при фазовых переходах также впервые наблюдали с помощью этого метода. Разработанные методические подходы к расчету таких структур оказались особенно актуальными сейчас, когда необходимо изучать структуру высокотемпературных сверхпроводников — как правило, сложных дефектных оксидов.

#### КОГДА КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРЯДКА НЕТ СОВСЕМ

Другой областью использования дифракции электронов является изучение различных веществ в аморфном состоянии — материалов, широко применяющихся в производстве полупроводниковых приборов, интегральных схем и других устройств. В качестве примера назовем диэлектрические слои различных оксидов; электрохромные  $WO_3$ ,  $MoO_3$ ; маскирующие слои фотошаблонов  $Fe_2O_3$ ; высокопрочные алмазоподобные углеродные слои и др. Высокие требования к стабильности этих устройств инициировали исследования структуры аморфных материалов, так как физические свойства, как известно, в значительной мере определяются структурой и составом.

В кристаллах атомы участвуют в рассеянии «стройными рядами» — по дифракционным картинам мы получаем



информацию прежде всего об атомных плоскостях. В аморфных телах атомы не упорядочены регулярным образом (отсутствует дальний порядок), и каждый атом рассеивает «сам по себе». Картина дифракции смазывается, и, казалось бы, что-то узнать о структуре объекта с ее помощью не удастся. Однако это не так.

Электроннограммы от аморфных пленок действительно не имеют выраженных рефлексов, а представляют собой размытые сферически симметричные гало. Проводя фурье-анализ экспериментальной зависимости интенсивности рассеянных электронов от угла рассеяния, можно получить функцию радиального распределения атомов в аморфном веществе<sup>6</sup>. Эта функция (рис.6) характеризует вероятность встречи с атомами того или иного сорта, находящимися на некотором расстоянии  $r$  от отсчетного. Она дает информацию о структуре ближнего порядка, который имеет место и в аморфных веществах: межатомных расстояниях, среднем числе ближайших соседей и среднем угле связи, но не позволяет определить ориентацию межатомных расстояний в пространстве и друг относительно друга. Хотя нам нее удается описать структуру в деталях, на основе найденных параметров можно построить модели аморфной структуры и при помощи моделирования перейти к более детальному описанию. К достоинствам метода следует отнести то, что он не требует никаких предварительных предположений о структуре исследуемого вещества.

#### ПОД ПРИЦЕЛОМ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ

В микроэлектронике активно используются эпитаксиальные слои полупроводников и других материалов. Качество таких слоев, так же как и параметры создаваемых на их основе приборов, зависит от размеров и

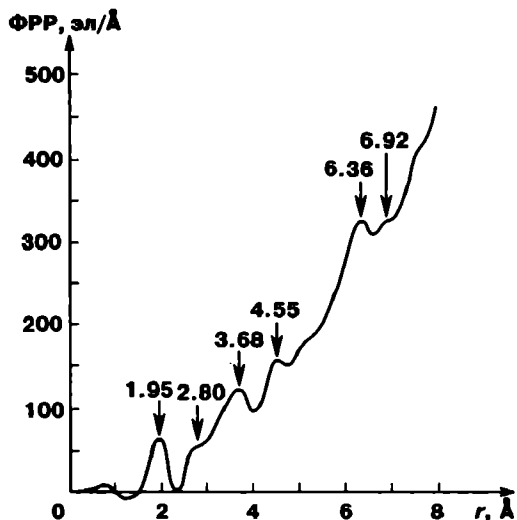


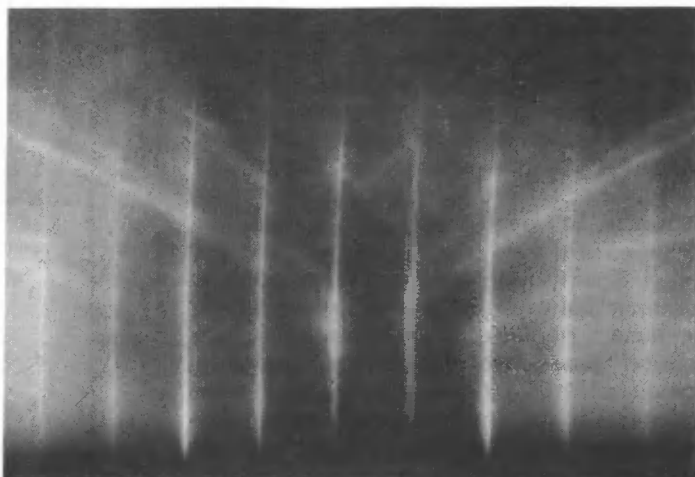
Рис. 6. Функция радиального распределения (ФРР) для аморфной пленки  $PbO_2$ . Максимумы соответствуют расстояниям до соседних атомов «первой очереди» (ближайших), «второй очереди» и т.д. Из значения площади под максимумом можно рассчитать число соседей.

ориентации кристаллитов, концентрации дислокаций и дефектов упаковки, межзеренных границ и т.д. Реальная структура эпитаксиальных слоев определяется условиями их зарождения и механизмом роста, чистотой и структурой поверхности подложки, ее ориентацией.

Первым методом, который стал использоваться для исследования совершенства структуры подложек и пленок при разработке вакуумной эпитаксиальной технологии, был метод дифракции электронов высоких энергий на отражение. В этом случае первичный пучок электронов, энергия которых может быть от 10 до 100 кэВ, падает на поверхность кристалла под скользким углом в несколько градусов. При такой геометрии глубина эффективного слоя, внутри которого происходит когерентное рассеяние электронов, составляет  $\sim 10^{-7}$  см. Поэтому падающие электроны взаимодействуют с несколькими кристаллическими плоскостями, параллельными поверхности.

<sup>6</sup> Татарина Л.И. Электронография аморфных веществ. М., 1972.

Рис. 7. Специфическая картина двумерной дифракции от поверхности  $\text{LiNbO}_3$ .



В зависимости от морфологии поверхности в создании картины дифракции могут участвовать как микроскопические выступающие участки, через которые электроны проходят насквозь (трехмерная дифракция), так и гладкие участки поверхности, дифракция от которых определяется упорядоченным положением поверхностных атомов (двумерная дифракция; см. рис.7). Кроме того, заметный вклад в интенсивность рассеяния способны внести структурные нарушения на поверхности кристалла и динамические эффекты многократного рассеяния и резонанса в приповерхностном слое. Поэтому извлечение количественной информации из этих данных требует учета различных по своей природе явлений и представляет весьма сложную как экспериментальную, так и теоретическую задачу<sup>7</sup>.

Важное преимущество данного метода — его сравнительная простота и возможность проведения неразрушающего контроля. Особенно ярко проявилось это преимущество в последние годы, когда метод дифракции электронов на отражение стал неотъемлемой частью установок молекулярно-лучевой эпитаксии. При этом было открыто явление осцилляции интенсивности рефлексов при дифракции

от поверхности растущего кристалла, которое позволило управлять структурой слоя в процессе роста *in situ* и создавать сверхрешетки с совершенной структурой отдельных слоев и границ раздела между ними<sup>8</sup>.

Здесь мы смогли лишь кратко коснуться тех вопросов, которые решаются с помощью электронографического структурного анализа, созданного Вайнштейном. Сфера применения этого метода продолжает расширяться. Так, в последние несколько лет он успешно используется при исследовании структуры слоистых молекулярных ансамблей — пленок Ленгмюра—Блоджетт. Эти пленки получают последовательным наложением органических молекулярных монослоев<sup>9</sup>; при чередовании монослоев из различных молекул могут быть собраны мультислойные пленки сложной архитектуры, и здесь мы уже вплотную подходим к молекулярной электронике. Борис Константинович Вайнштейн всегда с интересом следил за развитием работ в электронографии, а в осмыслении результатов по пленкам Ленгмюра—Блоджетт принял непосредственное участие<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> Городецкий А.Е. Исследование атомных поверхностных структур методом дифракции быстрых электронов на отражение // Спектроскопия и дифракция электронов при исследовании поверхностей твердых тел. М., 1985.

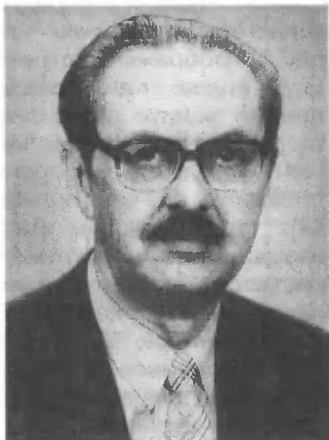
<sup>8</sup> Семилетов С.А. Электронография в исследовании закономерностей роста и структуры эпитаксиальных слоев // Методы структурного анализа. С.217—234.

<sup>9</sup> Левченко Е.Б., Львов Ю.М. Молекулярное зодчество // Природа. 1990. № 3. С.3—11.

<sup>10</sup> Вайнштейн Б.К., Клечковская В.В. // Кристаллография. 1994. Т.39. С.301—309.

# В поисках связей структура—свойства

В. И. Симонов



*Валентин Иванович Симонов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией рентгеноструктурного анализа и исполняющий обязанности директора Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН. Занимается прецизионным рентгеноструктурным анализом кристаллов, установлением связей между их атомным строением и физическими свойствами, исследованиями на атомном уровне структурных механизмов фазовых переходов. Заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии РАН им. Е. С. Федорова (1992).*

**Ф**ИЗИЧЕСКИЕ свойства кристаллического вещества определяются его строением, и конечная цель структурных исследований — установление связей между структурой и свойствами. С практической точки зрения, когда нужно иметь материал с определенными характеристиками, нас интересуют закономерности в цепи: получение материала — его структура — свойства. Надежные результаты в установлении этих связей могут быть получены только совместными усилиями специалистов разного профиля. Поэтому Б. К. Вайнштейн, сторонник комплексного подхода к изучению кристаллов, организовал в Институте кристаллографии исследования по полной схеме: синтез кристаллов, определение их структуры и, наконец, изучение физических свойств.

При переходе от феноменологического описания процессов, происходящих в кристаллах, к микроскопической теории этих явлений фундаментальное значение приобретают знания атомного (способа укладки атомов), реального (с учетом неизбежных дефектов) и электронного строения монокристаллов. Для монокристаллов сложных соединений первостепенную важность имеет химический состав, который фиксирован не строго: возможны изоморфные замещения (частичные статистические замещения в кристалле одних атомов другими) и нарушения стехиометрии (отклонения соотношений элементов от заданного химической формулой). Лучший инструмент для получения всей этой информации — современные дифракционные методы исследования строения твердого тела, особенно когда эксперименты проводятся при различных внешних воздействиях (температу-

ра, давление). Рассмотрим на нескольких примерах, как знание структурных особенностей позволяет от метода слепого поиска перейти к целенаправленному выращиванию материалов с прогнозируемыми свойствами.

#### МЕНЯЕМ АТОМ НА АТОМ

Первый реальный пример — управление на основе структурной информации свойствами нестехиометрических кристаллов флюоритового типа  $M^{2+}_x R^{3+}_x F^{1-}_{2+x}$  (здесь  $M$  и  $R$  — различные металлы). Эти материалы очень привлекательны своей прозрачностью в широком спектральном диапазоне, проводимостью по анионам  $F^{1-}$  и возможностью создания на их основе активных лазерных сред. Структура природного флюорита  $CaF_2$  представляет собой трехмерную шахматную укладку кубов — пустых с атомами фтора на вершинах ( $F_A$ ) и заселенных атомами кальция ( $Ca_F$ ). Первым обратил внимание на то, что в минералах  $CaF_2$  всегда содержатся изоморфные примеси трехвалентных редких земель, еще В.М.Гольдшмидт<sup>1</sup>. Затем по нейтронографическим и рентгеновским данным была построена атомная модель твердых растворов на основе структурного типа флюорита<sup>2</sup>. Было установлено, и это подтвердилось в дальнейшем, что основная позиция фтора дефектна, т.е. заселена не полностью. А вот предложенную этими авторами схему локализации дополнительных атомов  $F$ , замещающих «изгнанные» со своих законных мест и компенсирующих избыточную валентность катионов  $R^{3+}$  (по сравнению со своими предшественниками — катионами  $M^{2+}$ ), пришлось корректировать<sup>3</sup>.

Оказалось, что в зависимости от соотношения размеров катионов  $M^{2+}$  и  $R^{3+}$  образуются два различных семейства этих соединений. Как еще в 1965 г. показал термодинамическими расчетами В.В.Осико<sup>4</sup>, для структур флюоритового типа с редкими землями характерно наличие кластеров. На рис.1 изображено строение кластеров двух видов: один реализуется, когда ионный радиус двухвалентного катиона больше, чем трехвалентного (левая часть рисунка), а второй — в противоположном случае (правая часть рисунка). Еще сложнее эта схема в так называемых перегруженных твердых растворах, когда существенная часть двухвалентных катионов заменена на трехвалентные. Примером может служить соединение  $Ca_{0.85}Nd_{0.35}F_{2.35}$ , в котором появляются кластеры более сложного строения<sup>5</sup>.

Зная структурные особенности этих соединений, мы можем, меняя химический состав твердых растворов  $(M,R)F_{2+x}$ , получать кристаллы заданного строения и регулировать таким образом их физические свойства. Например, характеристики монокристаллов  $BaF_2$  и  $Ba_{0.89}La_{0.31}F_{2.31}$  таковы: параметр  $a$  (Å) кубической элементарной ячейки равен соответственно 6.200 и 6.097, температура плавления  $T_{пл}(^{\circ}C)$  — 1354 и 1484, твердость по плоскостям  $\{111\}$   $H$  (кгс/мм<sup>2</sup>) — 80 и 250 и, наконец, проводимость  $\sigma$  (Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>) по ионам  $F^{1-}$  при температуре 230<sup>o</sup>C —  $2 \cdot 10^{-11}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$ . В указанных пределах могут быть заданы любые значения физических характеристик кристаллов, определены их состав, строение и выражены монокристаллы с требуемыми параметрами. В этом случае особенно интересны суперионные свойства получаемых соединений. Путем изоморфного замещения в кристаллах бария на лантан в интервале от нуля до 31% можно целенаправленно изменять проводимость по

<sup>1</sup> Goldschmidt V.M., Thomassen L. // Vidensk.Skr.Mat.Nat. K1. 1923. № 2.

<sup>2</sup> Willis B.T.M. // J. Phys. 1964. V.25. P.431—439; Ceetham A.K., Fender B.E.F., Steel D. et al. // Solid State Commun. 1970. V.8. P.171—173.

<sup>3</sup> Александров Б.А., Гарашина Л.С. // Докл. АН СССР. 1969. Т.189. С.307; Мурадян Л.А., Максимов Б.А., Симонов В.И. // Координационная химия. 1986. Т.12. Вып.10. С.1398—1403.

<sup>4</sup> Осико В.В. // ФТТ. 1965. Т.7. В.5. С.1294—1302.

<sup>5</sup> Григорьева Н.Б., Отрощенко Л.П., Максимов Б.А. и др. // Кристаллография. 1996.

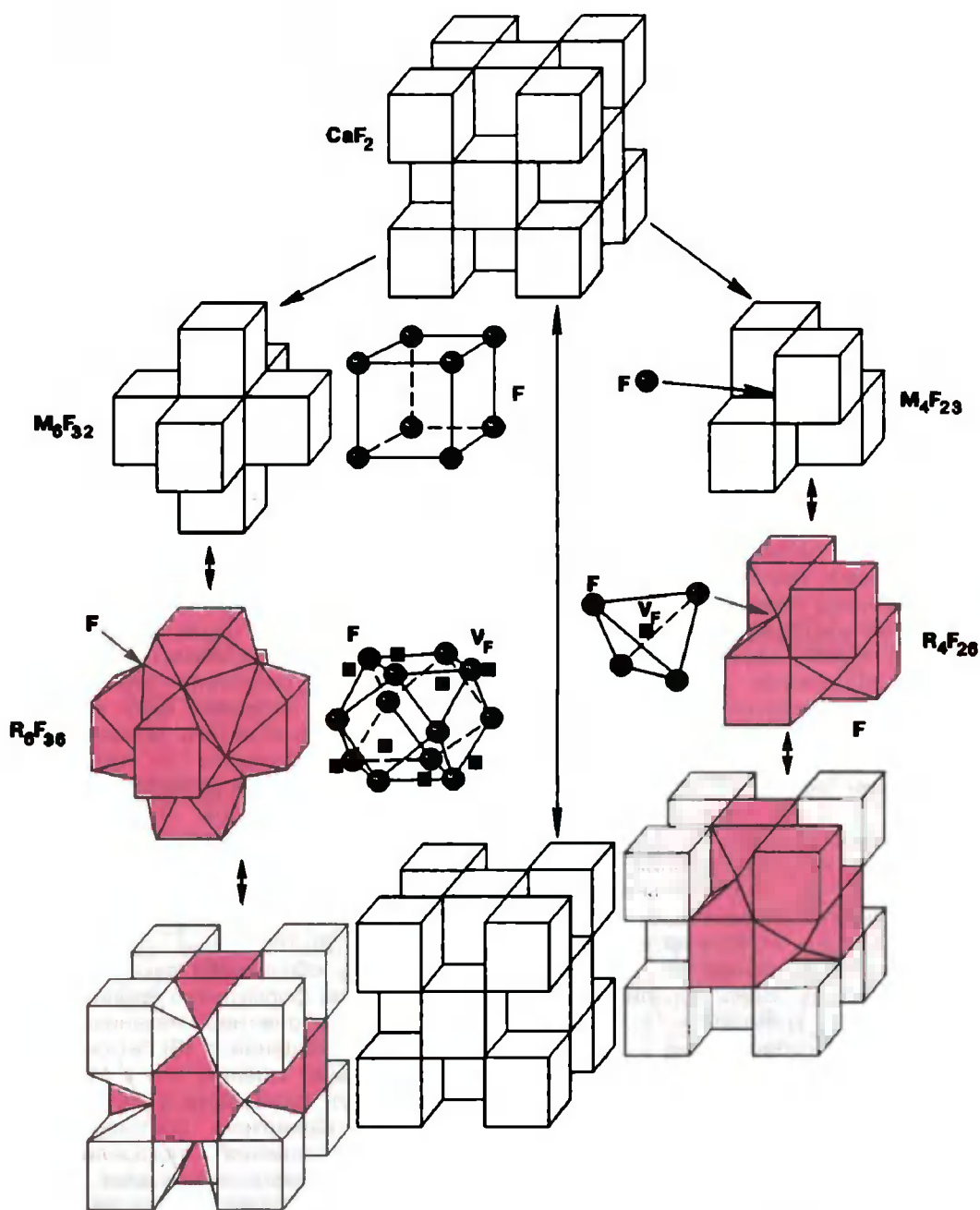


Рис. 1. Два типа кластеров, возникающих в нестехиометрических фазах  $M^{2+}_{1-x}R^{3+}_xF^{1-}_{2+x}$  на основе структуры флюорита  $\text{CaF}_2$ . При образовании кластера  $R_6F_{36}$  (левая сторона рисунка) удаляются 8 атомов фтора, показанных отдельно, и в образовавшейся полости на двойных осях симметрии структуры размещаются 12 дополнительных атомов F. Образование кластера  $R_4F_{26}$  сопровождается удалением одного отмеченного атома фтора и размещением на тройных осях симметрии структуры четырех дополнительных атомов F (правая сторона рисунка).

ионам фтора в соответствующих образцах на шесть порядков.

#### КАЛЕЙДОСКОП ИЗОМОРФНЫХ ЗАМЕЩЕНИЙ

Еще более показательный пример — семейство силленитов. Химическую формулу силленитов принято записывать в виде  $Bi_{12}MO_{20}$ , где  $M=Si, Ge, Ti, (Bi, Zn), (Ga, P)$  и т.д. Всего к настоящему времени синтезировано порядка 50 соединений такого типа. Название свое кристаллы получили по имени Л. Силлена, который выполнил первые исследования этих соединений<sup>6</sup>. Кристаллы кубические, но не имеют центра симметрии. Пьезоэлектрические и электрооптические свойства, фотопроводимость и другие физические характеристики обеспечивают силленитам большую популярность в пьезотехнике, акусто- и оптоэлектронике. Благодаря низкой скорости распространения ультразвуковых волн и большой величине пьезомодуля монокристаллы силленитов — это и линии задержки, и резонаторы, и усилители поверхностных волн. Высокая фоточувствительность в сочетании с электрооптическим эффектом позволяет применять их в пространственно-временных модуляторах света, а также для записи и воспроизведения фазовых голограмм с чувствительностью на уровне высоко разрешающих фотопластинок. Есть все основания считать, что многочисленное семейство силленитов должно занять одно из лидирующих мест среди кристаллов с особыми физическими свойствами.

Новые результаты, полученные нейтронографическими методами, заставляют иначе взглянуть на строение этих соединений и механизмы изоморфных замещений в них. Приведенная выше химическая формула, в которой содержится 20 атомов кислорода, однозначно говорит, что эффективная валентность катиона  $M^{4+}$  всегда равна четырем. Последние данные

по структуре силленитов показали, что у разных представителей этого семейства реализуются существенно различные механизмы изоморфных замещений. Доказано, что валентность катиона  $M$  в кристаллах может отличаться от четырех как в одну, так и в другую сторону и химическая формула может содержать как ровно 20 атомов кислорода, так и больше или меньше<sup>7</sup>.

Классическая структура силленита, представленная на рис.2,а, присуща соединению  $Bi_{12}GeO_{20}$ . В  $Ti$ -силлените имеет место дефектность по титану и кислороду: его точный состав —  $Bi_{12}Ti_{0.90}O_{19.80}$  (рис.2,б). Особенно интересные результаты получены при исследовании атомного строения  $(Fe, P)$ -силленита. Валентность и ионные радиусы катионов железа и фосфора отличаются радикально:  $r(Fe^{3+})=0.64 \text{ \AA}$ ,  $r(P^{5+})=0.35 \text{ \AA}$ . По всем законам кристаллохимии изоморфные замещения между столь различающимися катионами исключены. В соответствующем же силлените эти катионы статистически заселяют одну кристаллографическую позицию! Атомами кислорода они окружены по тетраэдру. Изоморфизм осуществляется за счет подстройки размеров тетраэдра к размеру соответствующего катиона (рис.2,в), при этом перестраиваются и «соседи». Химическая формула этого силленита, уточненная по структурным данным, —  $Bi_{12}(Fe_{0.35}P_{0.59}\square_{0.06})O_{20}$ ; символом  $\square_{0.06}$  обозначены вакансии, входящие на формульную единицу.

Еще любопытнее механизм изоморфных замещений в  $(Bi, Fe)$ -силлените. Существует мнение, что в  $M$ -тетраэдрах могут размещаться катионы  $Bi$  только в валентном состоянии  $+5$ . Наши исследования<sup>8</sup> показали, что фактически в этом случае идет замена тетраэдров  $[FeO_4]$  на группы зонтичной конфигурации  $[BiO_3]$  и мы имеем дело

<sup>7</sup> Radaev S.F., Simonov V.I., Kargin Yu.F., Skorikov V.M. // Eur. J. Solid State Inorg. Chem. 1992. V.29. P.383—392.

<sup>8</sup> Radaev S.F., Muradyan L.A., Simonov V.I. // Acta Crystallographica. 1991. V.B47. Part 1. P.1—6.

<sup>6</sup> Sillen L.G. // Ark. Kemi. Miner. Geol. 1937. V.12A. P.1.

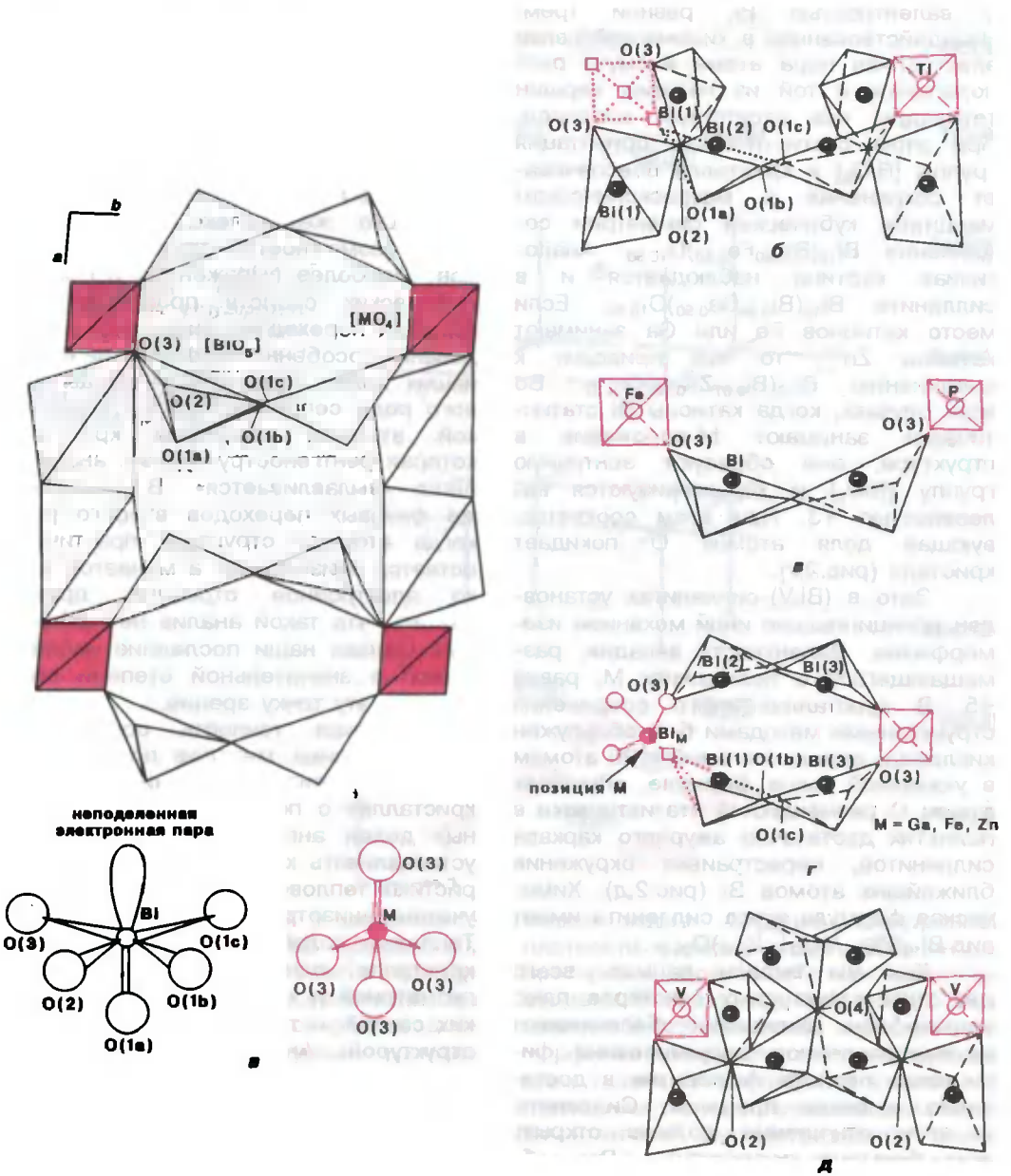


Рис. 2. Атомная модель структуры силленита и фрагменты структур, в которых реализуются разные механизмы изоморфных замещений.  
 а — исходная структура силленита  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ;  
 б — фрагмент структуры  $\text{Bi}_{12}\text{Pb}_{0.90}\text{O}_{19.80}$ , квадратами обозначены вакансии в положениях атомов  $\text{P}$  и  $\text{O}(3)$ ;  
 в — адаптация  $M$ -тетраэдров при заселении их катионами  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$  в структуре  $\text{Bi}_{12}(\text{Fe}_{0.35}\text{Pb}_{0.59}\square_{0.06})\text{O}_{20}$ ;  
 г — схема замещения тетраэдров  $[\text{MO}_4]$  на зонтичные группы  $[\text{BiO}_3]$  в структурах  $\text{Fe}$ -,  $\text{Ga}$ - и  $\text{Zn}$ -силленитов;  
 д — фрагмент структуры  $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}_{0.03}\text{V}_{0.89}\square_{0.08})\text{O}_{20.27}$  с размещением дополнительного атома  $\text{O}(4)$  в полости структуры силленита.

с валентностью  $\text{Bi}$ , равной трем. Незадействованная в химической связи электронная пара атома висмута располагается в той из четырех вершин тетраэдра, где отсутствует кислород. При этом статистическая ориентация группы  $[\text{BiO}_3]$  в кристалле обеспечивает сохранение в макроскопическом масштабе кубической симметрии соединения  $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}_{0.50}\text{Fe}_{0.50})\text{O}_{19.50}$ . Аналогичная картина наблюдается и в силлените  $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}_{0.50}\text{Ga}_{0.50})\text{O}_{19.50}$ . Если место катионов  $\text{Fe}$  или  $\text{Ga}$  занимают катионы  $\text{Zn}^{2+}$ , то это приводит к соединению  $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}_{0.67}\text{Zn}_{0.33})\text{O}_{19.33}$ . Во всех случаях, когда катионы  $\text{Bi}$  статистически занимают М-положение в структуре, они образуют зонтичную группу  $[\text{BiO}_3]$  и характеризуются валентностью +3. При этом соответствующая доля атомов  $\text{O}$  покидает кристалл (рис.2,г).

Зато в  $(\text{Bi},\text{V})$ -силленитах установлен принципиально иной механизм изоморфизма. Валентность ванадия, размещающегося в положениях М, равна +5. В кристаллах этого соединения структурными методами был обнаружен кислород, дополнительный к 20 атомам в указанной выше формуле. «Лишние» атомы  $\text{O}$  размещаются статистически в полостях достаточно ажурного каркаса силленитов, перестраивая окружение ближайших атомов  $\text{Bi}$  (рис.2,д). Химическая формула этого силленита имеет вид  $\text{Bi}_{12}(\text{Bi}_{0.03}\text{V}_{0.89} \square_{0.08})\text{O}_{20.27}$ .

Как мы видели раньше, всего два типа структурных кластеров плюс изоморфные замещения обеспечивают целенаправленное регулирование физических свойств флюоритов в достаточно широких пределах. Силлениты в этом отношении должны открыть еще большие перспективы. Разнообразие механизмов изоморфных замещений в них, безусловно, дает такие возможности воздействия на свойства, какие мы даже и не представляем и которые еще только предстоит изучить. Не следует забывать и то, что силлениты по сравнению с флюоритами лишены центра симметрии — это значительно расширяет перечень возможных физических свойств.

## ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ АТОМОВ И ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД

Поиск закономерностей в ряду получение — структура — свойства подразумевает, что мы умеем надежно обнаруживать перестройку структуры, которая вызывает изменение свойств. Насколько же далеко простираются такие возможности структурных методов? Наиболее выраженное изменение физических свойств происходит при фазовых переходах, поэтому их исследование особенно информативно для наших целей. Фазовые переходы первого рода сопровождаются перестройкой атомной структуры кристалла, которая рентгеноструктурным анализом легко «вылавливается». В отношении же фазовых переходов второго рода, когда атомная структура практически остается неизменной, а меняется только электронное строение, принято считать, что такой анализ не эффективен. Однако наши последние исследования<sup>9</sup> в значительной степени опровергают эту точку зрения.

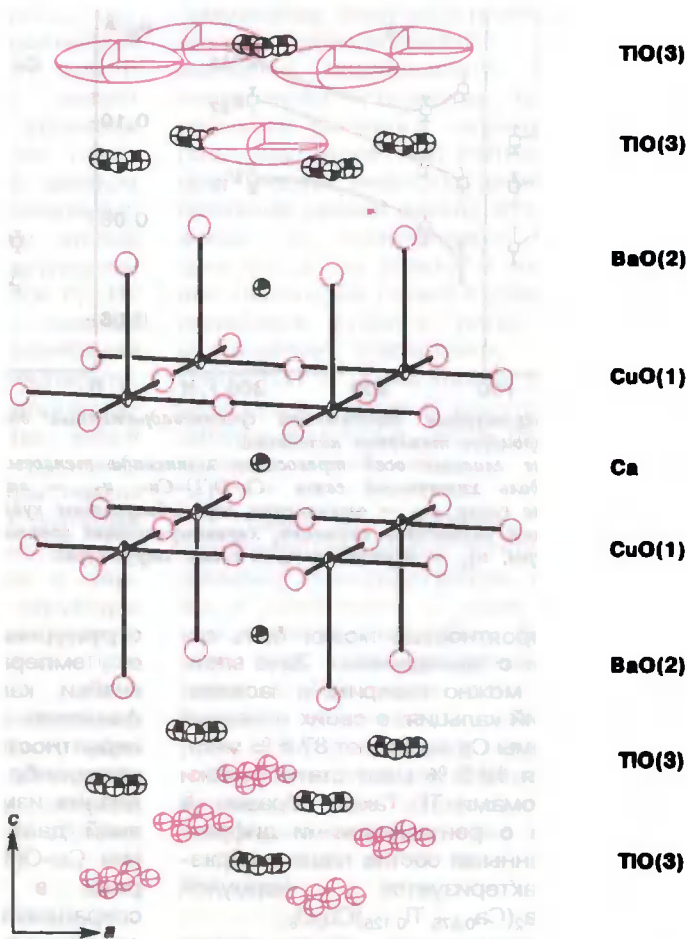
Высокая точность современных дифракционных методов позволяет не только находить положения атомов в кристаллах с погрешностью до тысячных долей ангстрема, но и надежно устанавливать количественные характеристики теплового движения атомов с учетом анизотропии и ангармонизма. Тепловые колебания данного атома в кристалле однозначно определяются геометрией и характером его химических связей — т.е. по сути электронной структурой. Аномальные особенности тепловых колебаний атомов в окрестностях фазового перехода могут рассказать о тех изменениях, которые происходят в электронной структуре твердого тела при фазовом переходе второго рода. Один из самых интересных таких переходов — это переход в сверхпроводящее состояние.

Подобный переход наблюдается,

<sup>9</sup> Симонов В.И., Молчанов В.Н., Мерисало М.Ю., Бломберг М.К. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т.59. Вып.4. С.231—234; Molchanov V.N., Tamazyan R.A., Simonov V.I. et al. // Physica C. 1994. V.229. P.331—345.



**Рис. 3.** Атомная модель сверхпроводника  $(\text{Pb}_{1,85}\text{Cu}_{0,15})\text{Ba}_2(\text{Ca}_{0,875}\text{Pb}_{1,125})\text{Cu}_2\text{O}_8$ ,  $T_c=110\text{ K}$ ; в пирамидальных купратных группах  $[\text{CuO}_5]$  обозначены химические связи. Атомы изображены с учетом их теплового движения (в виде кружков и эллипсов разного размера). Несколько расположенных рядом изображений показывают одни и те же атомы  $\text{Pb}$  и  $\text{O}(3)$  в разупорядоченном состоянии (в верхнем слое разупорядочение атомов кислорода представлено эллипсами, охватывающими возможные положения этих атомов). Кислород показан цветом.



например, при  $T_c=110\text{ K}$  у высокотемпературного сверхпроводника  $\text{Pb}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ . Чтобы понять, как ведут себя структурные параметры этого кристалла при превращении его в сверхпроводник, полные рентгеноструктурные исследования указанного монокристалла были выполнены при пяти разных температурах: 296, 160, 130 (до перехода в сверхпроводящее состояние), 90 и 60 K (после перехода).

Прежде всего необходимо было выяснить и уточнить химический состав, картину изоморфных замещений и возможного разупорядочения атомов в исследуемом образце. Атомы Ba и Cu, как оказалось, полностью заселяют свои положения. Изоморфные замещения были найдены только в позициях атомов Pb и Ca. В основной позиции таллия

имеет место дефицит электронной плотности, который может быть интерпретирован двояко: либо как заселение атомами Pb своих позиций на 92,6 % и наличие 7,4 % вакансий, либо как изоморфное замещение соответствующей доли таллия более легкими атомами. В последнем случае в качестве возможных заместителей рассматриваются атомы Ca или Cu. Однако среди исследователей есть и сторонники модели с вакансиями в позициях таллия. Из кристаллохимических соображений наиболее вероятным является гетеровалентное замещение ионов  $\text{Pb}^{3+}$  ионами  $\text{Cu}^+$ . Проверка по нашим экспериментальным данным моделей с вакансиями и с замещением таллия атомами Cu абсолютно надежного ответа не дала. Она только указала, что предпочтение с опре-

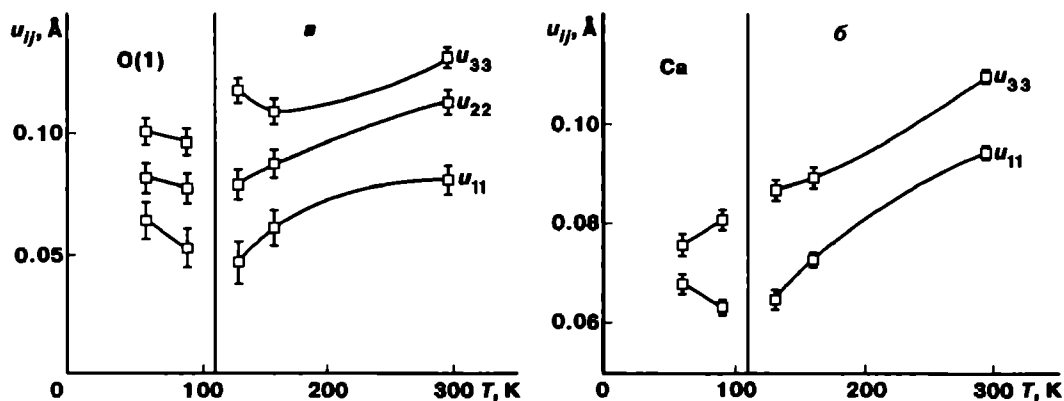


Рис. 4. Температурные зависимости среднеквадратичных отклонений атомов от положений равновесия в процессе тепловых колебаний.

а — поведение главных осей трихосного эллипсоида тепловых колебаний атома O(1):  $u_{11}$  — отклонения вдоль химической связи — Si-O(1)-Si-,  $u_{22}$  — отклонение в купратной плоскости перпендикулярно связи,  $u_{33}$  — отклонения, перпендикулярные купратному слою;

б — главные оси эллипсоида вращения, характеризующие тепловые колебания атома Ca:  $u_{11}$  — в слоях структуры,  $u_{33}$  — перпендикулярно слоям структуры.

деленной вероятностью может быть отдана модели с замещением. Зато вполне уверенно можно говорить о заселенности позиций кальция: в своих основных позициях атомы Ca занимают 87.5 % мест, а оставшиеся 12.5 % мест статистически заселены атомами П. Таким образом, в соответствии с рентгеновскими дифракционными данными состав нашего образца характеризуется формулой  $(\text{P}_{1.85}\text{Cu}_{0.15})\text{Ba}_2(\text{Ca}_{0.875}\text{P}_{0.125})\text{Cu}_2\text{O}_8$ .

Разупорядоченное расположение было обнаружено только у атомов П и O(3) (рис.3). Атомы П смещены с оси симметрии четвертого порядка на расстояние  $0.17 \text{ \AA}$ , сохраняющееся при понижении температуры. Это говорит о том, что мы имеем дело со статическим смещением, которое не может быть вызвано тепловым движением атомов. Надежно регистрируется и разупорядочение атомов O(3), хотя для более легких (по сравнению с таллием) атомов кислорода это сделать сложнее из-за их более слабой рассеивающей способности. С физической точки зрения более оправдана модель, в которой разупорядочение атомов П и O(3) скоррелировано.

Теперь, зная атомное строение исследуемого монокристалла, можно перейти к анализу изменения его

структурных параметров в зависимости от температуры. Объем элементарной ячейки, как и следовало ожидать для фазового перехода второго рода, в окрестностях перехода не проявляет каких-либо аномальных отклонений. Анализ изменения межатомных расстояний дает иные результаты. Расстояния Cu-O(1) до четырех атомов кислорода в купратной сетке заметно сокращаются, выдавая перестройку электронной структуры и соответственно химических связей в пирамидальных группах  $[\text{CuO}_5]$ . Эти изменения в геометрии купратных слоев структуры отражаются на поведении параметров а и с элементарной ячейки кристалла. Самые интересные результаты были получены при анализе поведения тепловых колебаний атомов. Оказалось, что окрестность перехода — место аномального поведения параметров тепловых колебаний атомов, которые в обычной ситуации увеличиваются с температурой. Наиболее характерно изменение колебаний атомов кислорода O(1), которые непосредственно связаны с атомами Cu и расположены в купратной плоскости (рис.3). Отклонения атомов O(1) от положений равновесия в процессе тепловых колебаний характеризуются трехосным эл-

липсоидом с главными осями  $U_{11}$ ,  $U_{22}$ ,  $U_{33}$ . Минимальные среднеквадратичные отклонения атомов O(1) имеют место вдоль сильных химических связей -Cu-O(1)-Cu-, средние по величине отклонения лежат в купратной плоскости под прямым углом к данным связям. И, наконец, максимальную амплитуду имеют колебания атома O(1) в направлении, перпендикулярном купратной плоскости (вдоль оси  $c$ ). Из рис.4,а видно, как меняются главные оси эллипсоида тепловых колебаний атома O(1) при изменении температуры. Фазовый переход в сверхпроводящее состояние отмечен на рис.4 вертикальной прямой. Для сравнения на рис.4,б показаны параметры тепловых колебаний атома Са, которые характеризуются эллипсоидом вращения. Этот эллипсоид вытянут в перпендикулярном к слоям структуры направлении. Колебания вдоль оси  $c$  ведут себя практически обычным образом.

Итак, мы обнаружили аномальное поведение параметров теплового движения атомов в кристалле в окрестностях фазового перехода второго рода, что открывает новую область

применения рентгеноструктурного анализа монокристаллов. Выявленные аномалии определяются изменением электронной структуры кристалла в процессе фазового перехода второго рода. Мы видим, что рентгеноструктурный анализ информативен для установления связей между атомным строением и физическими свойствами кристаллов не только в случае фазовых переходов первого рода, но и для переходов второго рода. При этом необходимо определять с высокой точностью и анализировать не только положения атомов и расстояния между ними в кристалле, но и параметры их тепловых колебаний.

Сама же проблема нахождения зависимостей между условиями выращивания монокристаллов, их строением и свойствами — одна из важнейших в кристаллографии, физике твердого тела и практическом материаловедении. Понимание этих связей открывает возможность целенаправленного синтеза новых перспективных кристаллических материалов и модификации путем изоморфных замещений известных кристаллов.

# Разнообразие жидких кристаллов

Б. И. Островский



*Борис Исаакович Островский, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории жидких кристаллов Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН. Занимается структурными исследованиями жидких кристаллов и упорядоченных органических пленок, термодинамикой и диэлектрическими свойствами мезоморфных систем.*

**Ж**ИДКИЕ кристаллы известны уже более ста лет, однако систематическое изучение их структуры началось только в начале 60-х годов. Борис Константинович Вайнштейн был одним из зачинателей исследований в этом направлении. Оно явилось естественным продолжением его фундаментальных работ по изучению особенностей дифракции рентгеновских лучей и электронов на цепных молекулах и строения этих объектов. Примером последних являются белки, нуклеиновые кислоты, каучуки и другие природные или синтетические полимеры. Из самой геометрии цепных молекул вытекает их тенденция к параллельной укладке, которая в ряде случаев приводит к резкой анизотропии свойств вдоль и поперек оси преимущественной ориентации<sup>1</sup>. Отсюда уже один шаг к изучению строения собственно жидких кристаллов (ЖК).

Первой из большой и продолжавшейся многие годы серии публикаций на эту тему была подготовленная Б.К.Вайнштейном совместно с И.Г.Чистяковым статья «Рентгеноанализ строения жидких кристаллов при помощи функций распределения» (1963). В то время ничто еще не предвещало бума в электронике, связанного с повсеместным использованием жидких кристаллов в устройствах отображения информации (сейчас рынок ЖК-дисплеев только для портативных компьютеров превысил миллиард долларов). Интуитивное осознание роли и значения жидких кристаллов как особого состояния вещества, промежуточного между твердыми кристаллами и изотропной жидкостью, послужило мотивацией для этих работ. Кроме того, явления самоорганизации по типу

© Б.И.Островский

<sup>1</sup> Вайнштейн Б.К. Дифракция рентгеновых лучей на цепных молекулах. М., 1963.

жидких кристаллов обоснованно рассматривались как мостик между неживой и живой материей.

Жидкие кристаллы, подобно жидкостям, обладают способностью течь, образовывать капли, но в то же время ведут себя и как кристаллы — проявляют анизотропию оптических, электрических и магнитных свойств вследствие того, что составляющие их молекулы определенным образом упорядочены. ЖК-состояние характерно для органических соединений, молекулы которых имеют сильно вытянутую или плоскую форму (рис.1). Эти соединения при плавлении не сразу переходят из кристаллического состояния в жидкое, а образуют одну или несколько промежуточных (мезоморфных) фаз, обладающих различной степенью ориентационного и трансляционного порядка. Исследования показали, что в зависимости от формы и строения молекул и внешних условий могут существовать ЖК-фазы, обладающие ориентационным (нематиками), одномерным трансляционным (смектики), двумерным трансляционным (дискотики) порядком, а также ламеллярные кристаллические и гекзатические фазы, кубические ЖК (рис.1, 2). Что же это за виды упорядочения и что из себя представляют такие объекты?

#### КАК ОПИСАТЬ ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ?

Прежде чем говорить о строении жидких кристаллов, поясним, какая информация нам доступна из экспериментальных данных. Взаимное расположение молекул описывается так называемой функцией межмолекулярных расстояний (функция Патерсона). Эта функция задает вероятность относительного расположения двух молекул и имеет максимумы в точках, отвечающих наиболее часто повторяющимся расстояниям между молекулами. В физике конденсированных сред ее чаще называют парной корреляционной функцией и обозначают  $g_2(r)$ . В атомарных жидкостях и средах, образованных сферически симметричными

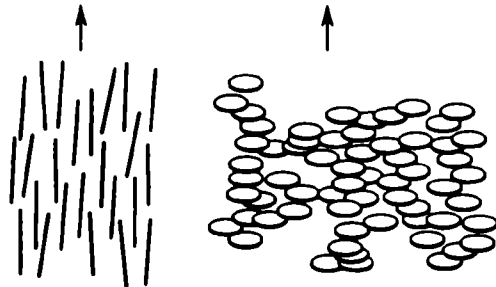


Рис.1. Ориентационное упорядочение в нематических жидких кристаллах, состоящих из палочкообразных (слева) и дискообразных молекул. Стрелками показаны направления преимущественных ориентаций длинных осей молекул и нормалей к плоскости дисков.

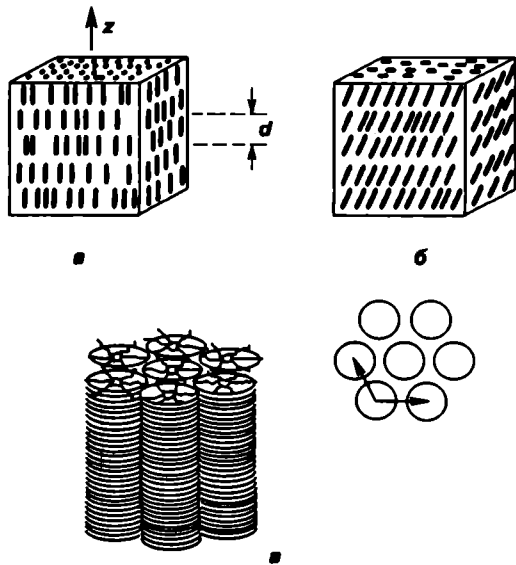


Рис.2. Смектические и дискотические жидкие кристаллы. В смектиках А (а) и С (б) молекулы располагаются слоями, сохраняя преимущественную ориентацию;  $d$  — период смектических слоев,  $z$  — направление трансляции. В дискотиках С длинные оси молекул наклонены относительно нормали к плоскости слоев. Дискотики образуют вместо слоев колонки, содержащие стопки дискообразных молекул (в). В направлении вдоль осей колонок система обладает свойствами жидкости, в то время как в плоскости дисков наблюдается дальний трансляционный порядок, отвечающий плоской гексагональной или ромбической сетке.

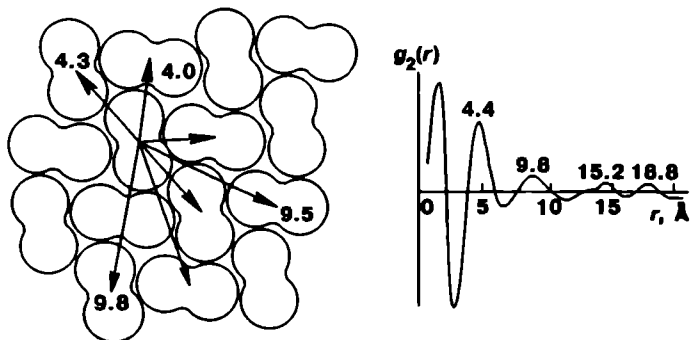


Рис.3. Использование функций межмолекулярных расстояний для анализа структуры ЖК: слева — проекции молекул нематического жидкого кристалла на плоскость, перпендикулярную ориентации их длинных осей, стрелками показаны расстояния до ближайших соседей; справа — функция межмолекулярных расстояний для нонилоксибензойной кислоты. Максимумы функции  $g_2(r)$  отвечают наиболее часто встречающимся расстояниям между молекулами.

молекулами, эта функция зависит только от расстояний между молекулами  $r$  (функция радиального распределения). В жидких же кристаллах ориентации соседних молекул не независимы и, следовательно, корреляционная функция зависит не только от  $r$ , но и от их взаимных ориентаций ( $\omega_i$ ):  $g_2(\omega_1, \omega_2, r)$ . Для ее нахождения в рентгеновском эксперименте измеряется распределение интенсивности рассеяния по углам. Вайнштейн и Чистяков<sup>2</sup> применительно к жидким кристаллам разработали методы решения обратной задачи структурного анализа — восстановление функции Патерсона из данных по рентгеновскому рассеянию. Хотя этих данных часто оказывается недостаточно для нахождения корреляционной функции  $g_2(\omega_1, \omega_2, r)$  в полном виде, на основе различных приближений удается определить зависимость функции от расстояний  $r$  между молекулами (здесь  $r$  — вектор: он задает не только длину соединяющего две молекулы отрезка, но и его ориентацию).

Наиболее простое предположение состоит в том, что корреляциями в ориентациях соседних молекул можно пренебречь. При этом  $g_2(\omega_1, \omega_2, r) \sim g_2(r)$ , т.е. зависит только от расстояний между молекулами, и выражение для интенсивности рассеяния жидким кристаллом существенно упрощается. Таким образом удается получить пред-

ставление о функции  $g_2(r)$  в определенных сечениях, в частности рассчитать корреляционную функцию  $g_2(r)$  проекций молекул на плоскость, перпендикулярную ориентации их длинных осей (рис 3).

Противоположный крайний случай отвечает полной корреляции в ориентациях молекул. Слово «полная» здесь не означает, что абсолютно все молекулы ориентированы в одном направлении. Полная корреляция в ориентациях соседних молекул существует в пределах корреляционной области. На больших же расстояниях и в целом в объеме ЖК длинные оси молекул распределены по ориентациям в соответствии с некоторой функцией распределения по углам. Это приближение оказывается достаточно точным для описания корреляций в направлении вдоль длинных осей и позволяет определить функцию углового распределения молекул.

ВОЗМОЖЕН ЛИ ИСТИННЫЙ ДАЛЬНИЙ ПОРЯДОК В СМЕКТИКАХ?

В нематических жидких кристаллах наблюдается лишь ориентационный порядок — выстраивание молекулярных осей в одном направлении (рис.1). Образование смектической фазы связано с возникновением одномерного слоевого порядка в жидкости. Такую структуру мы можем получить, если будем многократно переносить (транслировать) один слой в направлении оси  $z$  на расстояние  $d$  (рис.2,а); обычно  $d$  составляет 20—30 Å. Эта

<sup>2</sup> Вайнштейн Б.К., Чистяков И.Г. Симметрия, структура и свойства жидких кристаллов // Проблемы современной кристаллографии. М., 1975. С.12—26.

повторяемость в определенном направлении называется трансляционным порядком (в данном случае — одномерным, т.е. пониженным по отношению к пространственному трехмерному случаю). Может ли такой одномерный порядок продолжаться на сколь угодно больших расстояниях? Даже в твердых телах, как известно, тепловое движение приводит к отклонению атомов от своих равновесных положений. В смектиках тепловые флуктуации вызывают гораздо более сильные отклонения слоев от заданных позиций, которые описывают с помощью параметра  $u(\mathbf{r})$ , характеризующего смещение слоев. Как было показано еще в середине тридцатых годов Л.Д.Ландау и Р.Пайерлсом, истинный дальний порядок в средах с пониженным трансляционным порядком вообще невозможен из-за неустойчивости системы по отношению к флуктуациям положений смектических слоев. Так, среднеквадратичное смещение слоев  $\langle u^2(\mathbf{r}) \rangle \sim \ln R/d$  расходится логарифмически с увеличением размера образца  $R$ , т.е. для «больших» образцов о дальнем порядке говорить не приходится. Но логарифмическая зависимость, является очень слабой, и для образцов миллиметровых размеров амплитуда смещения слоев составляет всего  $\sigma = \langle u^2(\mathbf{r}) \rangle^{1/2} \approx 4-7 \text{ \AA}$ , т.е. слои все же существуют. Тем не менее различия между смектиками и системами с истинным дальним порядком есть и могут быть выявлены в прецизионных рентгеновских экспериментах.

Напомним, что в обычных трехмерных кристаллах картина дифракции представляет собой набор острых брэгговских пиков на некотором диффузном фоне. Тепловые колебания приводят к ослаблению интенсивности брэгговских рефлексов, что учитывается так называемым фактором Дебая—Уоллера  $W_n$ : интенсивность умножается на  $\exp(-2W_n) = \exp[-s_n^2 \langle u^2(\mathbf{r}) \rangle]$  ( $s_n$  — вектор рассеяния<sup>3</sup>, отвечающий  $n$ -му

порядку отражения), — однако не вызывают уширения линий. В бесконечном образце смектика брэгговские пики вообще отсутствуют из-за расходимости фактора Дебая—Уоллера с увеличением размера образца:  $\exp(-2W_n) \sim (R/d)^{-2n}$  ( $\eta$  — малый показатель степени порядка 0.1). Для образца смектика конечного размера  $R$  в дифракционной картине брэгговские пики все же наблюдаются (шириной  $\sim R^{-1}$ , но с значительно ослабленной интенсивностью).

Предсказания статистической теории относительно сред с пониженным трансляционным порядком могут быть проверены при изучении зависимости фактора Дебая—Уоллера от размера системы. Такие эксперименты стали возможны в конце 80-х годов, когда научились получать свободно подвешенные смектические пленки (СПСП) значительной площади (порядка  $1 \text{ см}^2$ ), пригодные для рефлектометрических измерений. Это позволило непосредственно наблюдать эффекты, связанные с изменением амплитуды флуктуаций смектических слоев в СПСП различной толщины.

Для изучения структуры СПСП обычно применяется геометрия скользящего отражения (рис.4, сверху). Известно, что в области, отвечающей используемому диапазону длин волн рентгеновского излучения ( $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ ), показатель преломления чуть меньше единицы — на величину  $3 \cdot 10^{-6}$  для органических материалов. Несмотря на малость этого отклонения, на границе раздела сред воздух—мезофаза в области малых углов наблюдаются такие классические явления, как отражение и интерференция. Вид кривой отражения в случае СПСП достаточно необычен (рис.4, внизу). Помимо общего спада интенсивности  $I$  по закону  $\sim s^{-4}$ , определяемому формулами Френеля, в СПСП наблюдаются одновременно и интерференция лучей, отраженных от передней и задней поверхностей пленки (полосы равного наклона), и дифракция на смектических (структурированных) слоях, дающая при достаточно большом числе слоев интенсивный брэгговский пик. Полная

<sup>3</sup> Вектор рассеяния представляет собой разность между волновыми векторами отраженной и падающей волн; его модуль  $s = 4\lambda \sin\theta/\lambda$ , где  $2\theta$  — угол рассеяния, а  $\lambda$  — длина волны излучения.

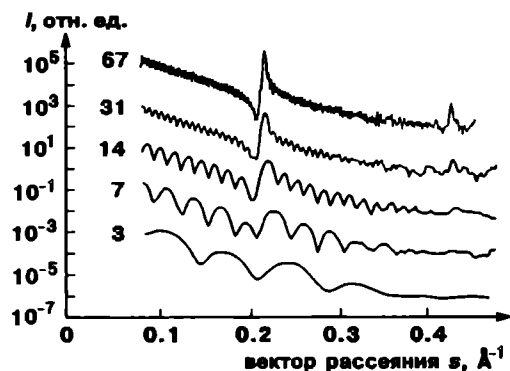


Рис.4. Рентгеновские эксперименты со свободно подвешенными смектическими пленками. СПСП представляют собой квазидвумерные объекты, в которых смектические слои ориентированы параллельно плоскости отверстия, ограничивающего пленку. Сверху — геометрия эксперимента: рентгеновские лучи падают под малыми углами к поверхности пленки; снизу — кривые отражения от СПСП жидкого кристалла гептилфлуорооктилпиримидина различной толщины; цифры у кривых — число слоев.

картина отражения от СПСП представляет собой результат интерференции между полосами равного наклона и брэгговскими пиками.

Из положения интерференционных максимумов можно определить общую толщину СПСП. Анализ кривых отражения позволяет проследить изменения интенсивности квазибрэгговских рефлексов в СПСП различной толщины и проверить тем самым предсказания теории для зависимости фактора Дебая—Уоллера от размера системы. Измерения, выполненные на СПСП жидких кристаллов октилцианобифенила и гептилфлуорооктилпиримидина (рис.4, внизу) толщиной от 10 до нескольких сотен слоев подтвердили справедливость теоретических оценок параметров этой зависимости<sup>4</sup>. Таким

образом, тепловые флуктуации положений слоев в смектиках достаточно сильны, чтобы воспрепятствовать установлению дальнего порядка в системе, и истинного дальнего порядка здесь нет.

#### ОТ ОДНОМЕРНЫХ К ДВУМЕРНО- ПЕРИОДИЧЕСКИМ ФАЗАМ

Пока мы говорили об упорядоченном расположении слоев в смектиках А и С. Эти фазы отличаются своей симметрией: фаза С менее симметрична, чем А (рис.2,а,б), но в плоскости слоев в обоих случаях центры масс молекул распределены хаотично. Возможен ли позиционный порядок (упорядоченное расположение центров масс) в пределах самого слоя? Оказывается — да. При понижении температуры смектики А и С переходят в менее симметричные фазы, обладающие различной степенью порядка в расположении центров масс молекул в слоях, — смектики В, G, I и т.д. При переходе в фазу типа смектика В диффузное кольцо, характерное для рассеяния смектической фазой А в плоскости слоя, заменяется на дискретное расположение рефлексов, обладающих, как правило, гексагональной симметрией (рис.5). Это доказывает, что в плоскости слоя появился дальний порядок в ориентации связей между молекулами: если какую-либо молекулу соединить мысленно с соседними, то эти направления будут образовывать одинаковые плоские фигуры — звезды направленных. Однако дальний позиционный порядок при этом может и отсутствовать (эти фигуры могут слегка сдвигаться друг относительно друга). В этом случае распределение интенсивности рассеянного излучения в окрестности рефлекса будет иметь диффузную природу и описываться функцией  $1/(1+\xi_{\perp}^2(s-s_n)^2)$  с конечной корреляционной длиной  $\xi_{\perp}$  (она, напомним, служит мерой расстояния, на котором сохраняется упорядоченность). Такая форма рефлексов (с корреляционной длиной в плоскости слоя  $\xi_{\perp} \sim 30\text{--}200 \text{ \AA}$ )

<sup>4</sup> Lambooy P., Ostrovskii B.I., Jeu W.H. de // 14-th Intern. Liq. Cryst. Conf. Pisa, Italy, 1992. FP83.



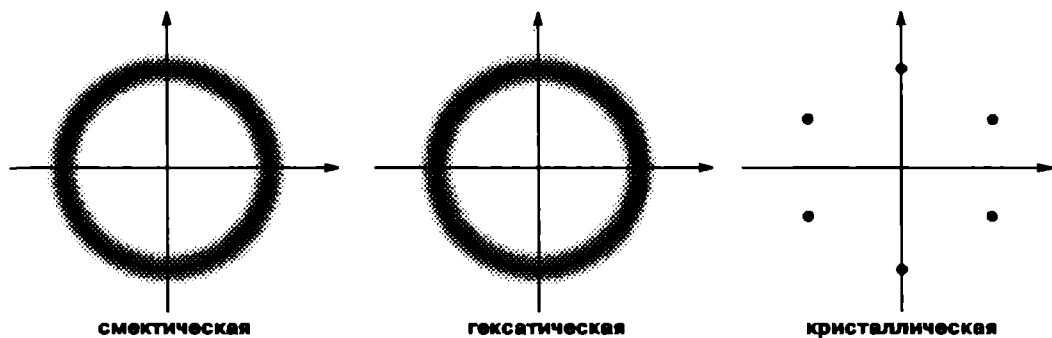


Рис. 5. Картины рентгеновского рассеяния в плоскости смектических слоев, отвечающие различным фазам.

была обнаружена у ряда смектиков В. Эти фазы с ближним позиционным порядком в плоскости слоя и дальним порядком в ориентации связей получили название «гексатики». По сути гексатики — это кристаллы, утратившие трансляционный порядок своей решетки, но сохранившие упорядоченность в ориентации связей. Однако встречаются и такие смектики В, где наблюдаются острые брэгговские пики, характерные для кристаллов, т.е. имеет место дальний позиционный порядок в слоях<sup>5</sup>. В настоящее время можно считать твердо установленным, что существуют оба типа смектиков с позиционными корреляциями в плоскости слоя — кристаллы и гексатики. Казалось бы, кристаллические смектики — это обычные кристаллы, однако из-за слабости межслоевого взаимодействия по целому ряду свойств (например, по величине анизотропии упругих модулей) они отличаются от классических молекулярных кристаллов. Поэтому соответствующие фазы в ЖК принято называть ламеллярными кристаллами.

Дискотические ЖК, или дискотики, демонстрируют еще одну возможность реализации систем с пониженной трансляционной упорядоченностью, а именно фаз, обладающих двумерной решеткой в трехмерной среде. Молекулы, образующие диско-

тические ЖК, содержат жесткое плоское центральное ядро и шесть присоединенных к нему углеводородных цепей (рис. 6, слева). Дискотики могут образовывать нематическую мезофазу с дальним ориентационным порядком нормаль к плоскости дисков (рис. 1, справа), а также более упорядоченные колончатые мезофазы, представляющие собой двумерные решетки из жидких столбиков<sup>6</sup> (рис. 2, в).

Существование систем с одномерной (смектики А и С) и двумерной (дискотики) периодичностью естественно поднимает вопрос о путях перехода между этими двумя состояниями. До последнего времени ответ был совершенно неясен, поскольку стержнеобразные и дискотические молекулы не смешивались друг с другом. Ситуация коренным образом изменилась после появления молекул, совмещающих в себе свойства и стержней, и дисков — так называемых фазмидиков, или поликатенарных соединений. Они состоят из длинного центрального ядра, содержащего пять или шесть бензольных колец, и протяженных алифатических цепей, присоединенных к концевым циклам (рис. 6, справа). Фазмидики способны образовывать как колончатые, так и смектические фазы (смектик С). Исследование смесей фазмидиков с некоторыми стержнеобразными молекулами, образующими смектическую фазу А, показало, что переход от одномерно-периодической в колончатую фазу (т.е. двумерно-пе-

<sup>5</sup> Moncton D.E., Pindac R. // Phys. Rev. Lett. 1979. V.43. P.701—704.

<sup>6</sup> Chandrasekhar S. // Contemp. Phys. 1988. V.29. P.527—558.

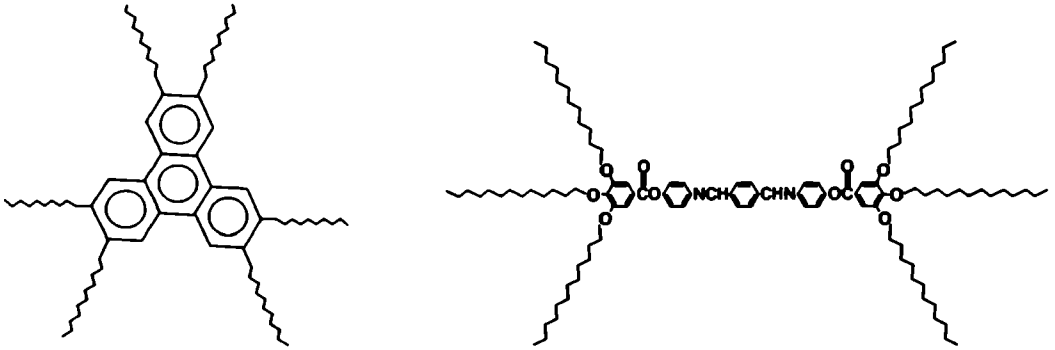


Рис. 6. Примеры дискообразных (слева) и полифенильных молекул.

риодическую) может быть осуществлен через ряд последовательных фаз без разрушения трансляционного порядка.

#### ФРУСТРИРОВАННЫЕ СМЕКТИКИ

До сих пор мы в основном рассматривали жидкие кристаллы, образованные симметричными стержнеобразными молекулами. Эти молекулы состоят из жесткого центрального ядра и гибких концевых углеводородных цепей. В смектических слоях подобные молекулы ориентируются «вверх» и «вниз» произвольным образом. Успехи в синтезе полярных и стерически асимметричных молекул помогли обнаружить совершенно новые типы смектических фаз, в которых нарушена симметрия в расположении «голов» и «хвостов» молекул (рис.7). Свойства смектических фаз  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_d$  определяются конкуренцией между слоевыми структурами, соразмерными или несоизмерными молекулярной длине. В зависимости от молекулярного строения и внешних условий (температура, давление, концентрация в смесях) смектический слоевой порядок в ЖК может разрушаться с повторным или многократным появлением нематической фазы (эффект фрустрации), либо наблюдается превращение в двумерно-периодические смектические фазы. Жидкие кристаллы, для которых харак-

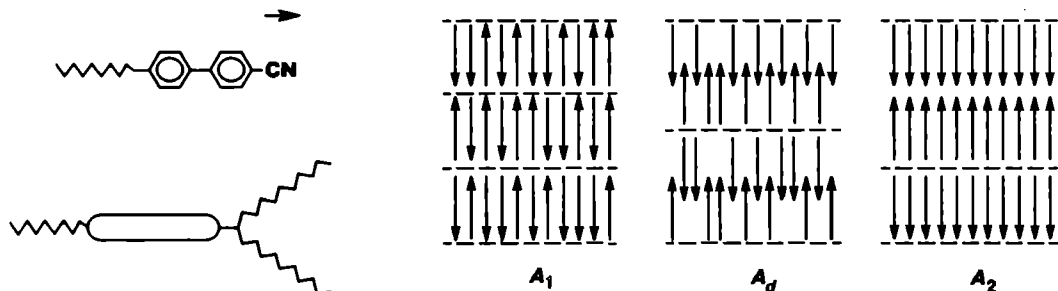
терны описанные выше явления, получили название «фрустрированные смектики»<sup>7</sup>.

Аналогичное поведение наблюдалось ранее для адсорбированных мономолекулярных пленок. Например, в монослое криптона на поверхности графита дисперсионное взаимодействие между молекулами газа задает пространственную периодичность, несоизмерную параметрам решетки подложки. С уменьшением температуры здесь наблюдается переход от несоизмерной к соразмерной двумерной структуре через промежуточный жидкий (неупорядоченный) монослой. Тут проявляются общие для систем пониженной размерности эффекты, когда тепловые флуктуации положений слоев оказываются достаточно сильными, чтобы размыть неустойчивый кристаллический порядок.

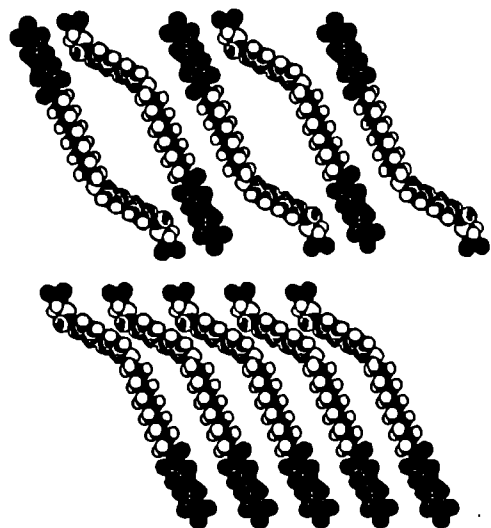
Новые типы наклонных смектических фаз были обнаружены для так называемых полифильных молекул. Эти молекулы содержат фрагменты, отличающиеся своей химической природой, например жесткую перфлуороалкильную цепь — гибкую углеводородную цепь — жесткое, легко поляризуемое бифенильное ядро (рис.8). Исследования спектров ИК-поглощения показали, что молекулы в низкотемпературной смектической фазе находятся в сильно изогнутой конформации<sup>8</sup>. При этом бифенильный фрагмент и перфториро-

<sup>7</sup> Gennes P.G. de, Prost J. The Physics of Liquid Crystals. Oxford, 1993.

<sup>8</sup> Blinov L.M., Lobko T.A., Ostrovskii B.I. et al. // J.Phys. II. 1993. V.3. P.1121—1139.



**Рис. 7.** Структура фрустрированных смектико: слева — примеры полярных и стерически асимметричных мезогенных молекул, стрелка указывает направление концевого дипольного момента. Справа — одноосные смектические фазы:  $A_1$  — монослойовой смектик с периодом слоев  $d$ , приблизительно равным длине молекулы  $L$ , полярные «головы» молекул равномерно ориентированы вверх и вниз; смектик  $A_d$  с периодом слоев, несоизмерным с длиной индивидуальных молекул —  $L < d < 2L$ , молекулы образуют локальные пары (димеры) с антипараллельной ориентацией диполей;  $A_2$  — бислойовой смектик с периодом  $d \approx 2L$  и антисегнетоэлектрическим упорядочением концевых дипольных моментов.



**Рис. 8.** Строение смектического  $C$  слоя, содержащего палифильные молекулы в зигзаг-конформации: вверху — «хвосты» и «головы» молекула неразличимы; внизу — полярный слой, в котором одинаковые молекулярные фрагменты направлены в одну сторону.

ванная цепочка наклонены относительно нормали к плоскости слоя на углы  $56^\circ$  и  $26^\circ$  соответственно. Анализ показывает, что оптимальная упаковка

таких изогнутых молекул в фазе  $C$  достигается только при нарушении симметрии в расположении «голов» и «хвостов» молекул в слоях. Симметрия смектических слоев при этом становится полярной (не содержащей центра симметрии) и допускает существование поляризации в плоскости наклона молекул (рис. 8).

**ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ?**

Сегнетоэлектрики — это вещества, в которых возникает самопроизвольная электрическая поляризация и ее направление может быть изменено под действием электрического поля. Уместно задать вопрос: могут ли существовать жидкокристаллические сегнетоэлектрики? Является ли регулярный кристаллический порядок необходимым условием для возникновения спонтанной поляризации?

Каких-либо принципиальных запретов на существование полярных (сегнетоэлектрических, пирозлектрических) ЖК с полярной симметрией не существует<sup>9</sup> (рис. 9, вверху). Однако к настоящему времени удалось обнаружить смектики  $A$ , обладающие исключительно квадрупольной (неполярной) симметрией. Такое поведение, разумеется, не случайно. Для молекул, обладающих небольшими дипольными моментами  $\mu \leq 1$  Д, энергия диполь-дипольного взаимодействия  $\mu^2/a^3$  много меньше энергии теплового движения  $k_B T$  вплоть до точки кристаллизации ЖК ( $a$  — среднее расстояние между диполями,  $a \approx 5 \text{ \AA}$ ). Поэтому кристал-

<sup>9</sup> Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М., 1981.

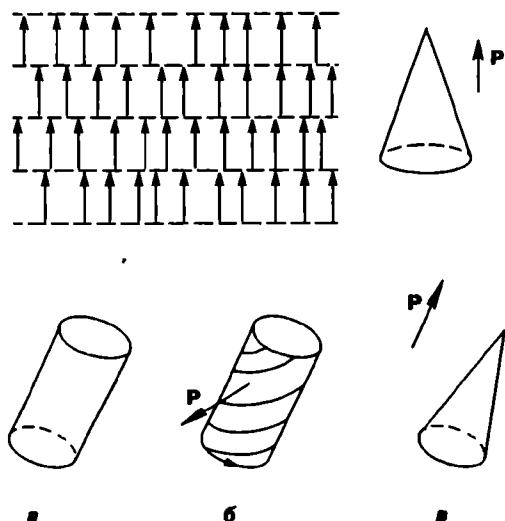


Рис.9. Типы упорядочения и направление вектора поляризации различных жидкокристаллических фаз. Геометрические фигуры иллюстрируют симметрию этих фаз. Вверху — гилотетический полярный смектик А, продольные дипольные моменты молекул направлены в одну сторону; внизу — образование полярных фаз в смектике С: а — неполярный смектик С с центром симметрии, или, что то же, с плоскостью симметрии (здесь — вертикальной) и перпендикулярной ей осью второго порядка; б — хиральный смектик С (отсутствует плоскость симметрии и система имеет симметрию «закрученного» цилиндра). Центр симметрии исчезает, полярная ось второго порядка перпендикулярна плоскости наклона молекул; в — полярный смектик С (единственный элемент симметрии — вертикальная плоскость симметрии). Центра симметрии снова нет, вектор поляризации лежит в плоскости наклона молекул.

лизация осуществляется раньше, чем мог бы реализоваться переход в полярное состояние. С другой стороны, когда молекулы обладают большими постоянными дипольными моментами, как у цианобифенилов, где  $\mu \sim 4-5$  Д, энергия диполь-дипольного взаимодействия становится сравнимой с  $k_B T$ . Однако в этих случаях молекулы ЖК имеют тенденцию к образованию слоев с антипараллельной ориентацией молекулярных диполей (рис.7, справа). Модельные расчеты, выполненные с учетом основных взаимодействий в ЖК, показывают, что для

сравнительно простых молекул типа цианобифенилов сегнетоэлектрическая смектическая фаза А является неустойчивой независимо от положений молекулярных диполей. Это делает малоперспективными попытки найти проявления собственного сегнетоэлектричества в таких смектиках для молекул с большими продольными дипольными моментами.

Однако существуют и иные пути реализации полярного состояния в жидких кристаллах. Можно попытаться получить выделенное (полярное) направление в ЖК за счет других, не диполь-дипольных взаимодействий. Ориентация молекулярных диполей вдоль полярного направления при этом оказывается вторичным эффектом, обусловленным тем, что дипольный момент жестко связан с молекулярным остовом. Так, оригинальная идея Р.Мейера состояла в том, что в смектической фазе С от центра симметрии можно избавиться за счет использования хиральных молекул<sup>10</sup>. В результате симметрия смектика становится полярной с особым направлением в плоскости слоев, вдоль которого возникает макроскопическая поляризация (рис.9,б, внизу). Проведенные эксперименты показали, что возможно быстрое переключение оптических состояний тонкого слоя сегнетоэлектрического ЖК под действием небольших электрических полей. Поэтому эти материалы нашли широкое применение в экономичных устройствах обработки и отображения информации, таких как пространственные модуляторы света, плоские компьютерные и телевизионные дисплеи, оптические прерыватели и т.д.

Другая возможность получения полярного состояния в смектической фазе С связана с возникновением поляризации в плоскости наклона молекул (рис.9,в, внизу). Для этого молекулы вовсе не обязаны быть хиральными, однако необходимо иметь дополнительное взаимодействие в сис-

<sup>10</sup> Meyer R.B., Liebert L., Strzelecki L., Keller P.J.// J. Phys. Lett. 1976. V.36. P.69-74.

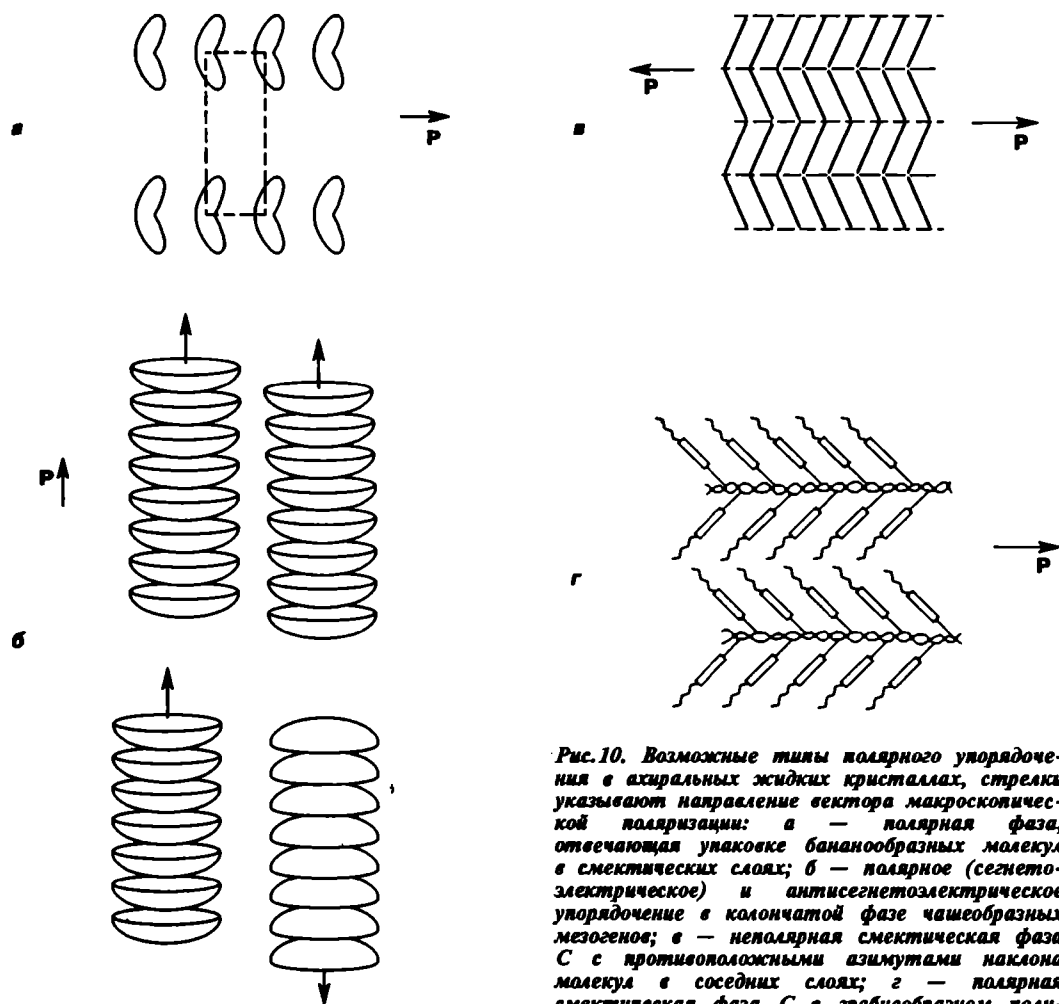


Рис.10. Возможные типы полярного упорядочения в ахиральных жидких кристаллах, стрелки указывают направление вектора макроскопической поляризации: а — полярная фаза, отвечающая упаковке бананообразных молекул в смектических слоях; б — полярное (сегнетоэлектрическое) и антисегнетоэлектрическое упорядочение в колончатой фазе чашеобразных мезогенов; в — неполярная смектическая фаза С с противоположными азимутами наклона молекул в соседних слоях; г — полярная смектическая фаза С в гребнеобразном полимерном жидком кристалле.

теме, обусловленное, например, стерической асимметрией молекул, которое может компенсировать невыгодное параллельное расположение молекулярных диполей. Подобное полярное упорядочение реализуется в смектической фазе С некоторых полифильных ЖК<sup>11</sup> (рис.8). Сходное сегнетоэлектрическое поведение было недавно обнаружено в смектической фазе, образованной молекулами бананообразной формы<sup>12</sup>

(рис.10,а). Имеются также указания на то, что полярное упорядочение возникает в колончатой гексагональной фазе, образованной чашеобразными молекулами, симметрия которой становится полярной вследствие исключительно асимметричной формы молекул ЖК (рис.10,б).

Новые типы полярных состояний были обнаружены у смектиков С с чередующимся направлением наклона молекул в соседних слоях (рис.10,в, г). Подобное упорядочение является в общем случае неполярным. Однако, если каким-либо образом нарушить симметрию в расположении «голов» и

<sup>11</sup> Tournilhac F., Bllnov L.M., Simon J., Yablonsky S.V. // Nature. 1992. V.359. P.621–623.

<sup>12</sup> Takezoe H., Niori T., Watanabe J. et al. // J.Mater.Chem. 1996. V.6. P.1231–1234.

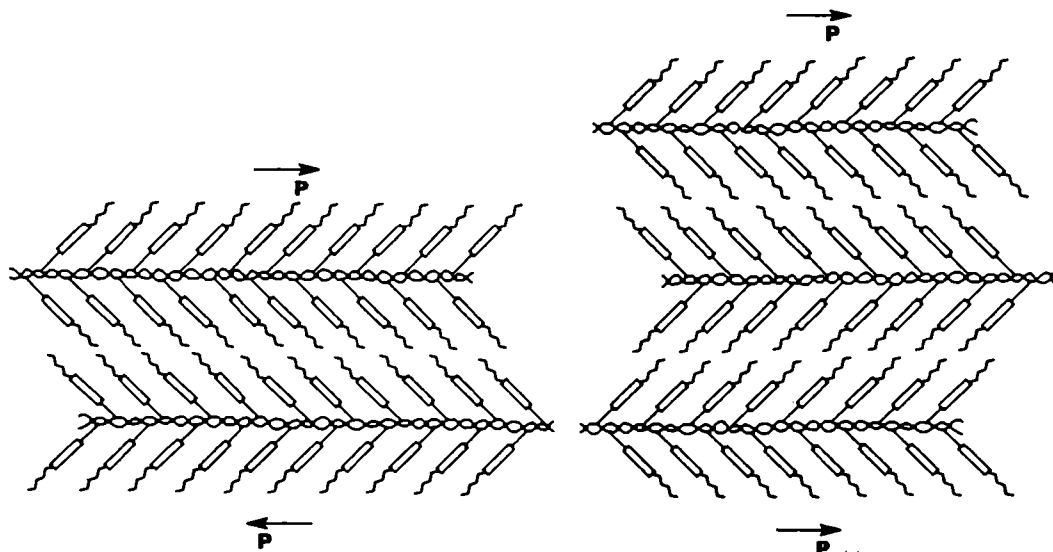


Рис. 11. Строение антисегнетоэлектрического смектика С, состоящего из гребнеобразных молекул: слева — число слоев четное (здесь — два); справа — число слоев нечетное (три).

«хвостов» молекул в слоях, симметрия смектика станет полярной, разрешающей возникновение поляризации в плоскости слоя. Это может быть достигнуто за счет использования растворителя в амфифильной системе или гребнеобразных ЖК-полимеров (рис.10,г). Характерное антисегнетоэлектрическое поведение, отвечающее этой модели, было недавно обнаружено в ахиральной смеси гребнеобразного ЖК-полимера (бислоевой смектик С) с его мономером<sup>13</sup>. Свободно подвешенные пленки из гребнеобразных молекул удастся выращивать столь тонкими, что они содержат всего несколько бислоев-«гребешков» — на-

чиная с двух. При этом наблюдается своеобразный эффект «чет-нечет»: когда число бислоев четное, пленка не обладает поверхностной поляризацией (рис. 11, слева), а когда это число нечетное — появляется макроскопический дипольный момент (рис. 11, справа). Таким образом, возможности обнаружения новых типов полярного упорядочения для сложных, стерически асимметричных молекул еще далеко не исчерпаны.

В заключение отметим, что приведенные примеры не охватывают всего многообразия мезоморфных состояний. Так, мы не коснулись вопросов строения полимерных и лиотропных жидких кристаллов, а также хиральных систем. Синтез новых сложных органических молекул, равно как и совершенствование техники дифракционных измерений и анализа, несомненно приведет к открытию новых типов мезоморфных структур и уточнению строения уже известных.

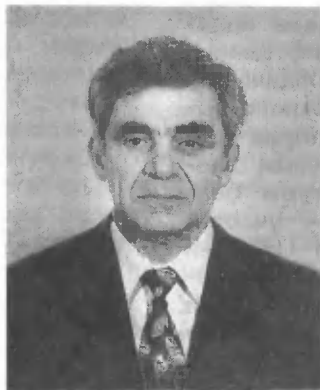
<sup>13</sup> Soto Bustamante E., Yablonskii S.V., Ostrovskii B.I., Bilnov L.M. et al. // Chem. Phys. Lett. 1996. V.260. P.447—452.

# Пространственная структура белков

В. Р. Мелик-Адамян, Э. Г. Арутюнян, К. М. Поляков



*Вильям Рафаилович Мелик-Адамян, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории структуры биокристаллов Института кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН. Область научных интересов — кристаллизация и рентгеноструктурный анализ белков, стереохимические основы функциональной активности ферментов.*



*Эмиль Гайкович Арутюнян, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией структуры биокристаллов. Специалист в области белковой кристаллографии, рентгеноструктурного анализа и кристаллохимии белков.*



*Константин Михайлович Поляков, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Занимается рентгеноструктурными исследованиями рибонуклеаз микроорганизмов и выяснением структурных основ их функционирования.*

Белки и нуклеиновые кислоты — важнейшие молекулы в живой природе. Нуклеиновые кислоты обеспечивают воспроизведение и передачу информации, а белки осуществляют реакции обмена веществ в живых организмах, служат катализаторами биохимических реакций, связывают и переносят более простые молекулы или электроны, выполняют регуляторные и защитные функции. Понять механизмы функционирования и взаимодействия этих сложнейших биологических макромолекул невозможно без знания их строения и пространственной организации. Структурную основу для изучения физико-химических свойств таких молекул создает рентгеноструктурный анализ белков, нуклеиновых кислот и вирусов. В настоящее

время это одно из важнейших направлений кристаллографии и одновременно молекулярной биологии. Инициатором и главой этого направления исследований в нашей стране был академик Б.К.Вайнштейн<sup>1</sup>.

## КАК УСТРОЕНЫ МОЛЕКУЛЫ БЕЛКОВ

Все белки представляют собой линейную полимерную молекулу, в которой 20 типов разных аминокислот ковалентно связаны между собой пептидными связями в строго определенной для каждого белка последовательности:  
 $-NH-CR_1-CO-NH-CR_2-CO-NH-CR_3-CO-NH-$

<sup>1</sup> Вайнштейн Б.К. Структура веществ биологического происхождения // Современная кристаллография. М., 1979. Т.2. С.193—245; Вайнштейн Б.К. Кристаллы и молекулы белков // Наука и человечество. М., 1986. С.153—173; Вайнштейн Б.К. // Наука и жизнь. 1986. № 8. С.37—45.

где  $R_1, R_2, R_3$  — различные аминокислотные остатки.

Такая полипептидная цепь может содержать от нескольких десятков до нескольких сотен аминокислотных остатков. В пространстве она свернута сложным образом и скреплена водородными связями. Способ свертывания у каждого белка свой и определяется последовательностью аминокислотных остатков, так называемой **первичной структурой** белка. Важнейшими элементами **вторичной структуры** белков являются  $\alpha$ -спирали — участки цепи, в которых  $N$ -й и  $(N+3)$ -й аминокислотные остатки связаны водородными связями (рис. 1), и слои с  $\beta$ -структурой, состоящие из расположенных рядом вытянутых участков цепи, соединенных водородными связями (рис. 2). Слои с  $\beta$ -структурой могут иметь параллельное или антипараллельное расположение соседних участков.

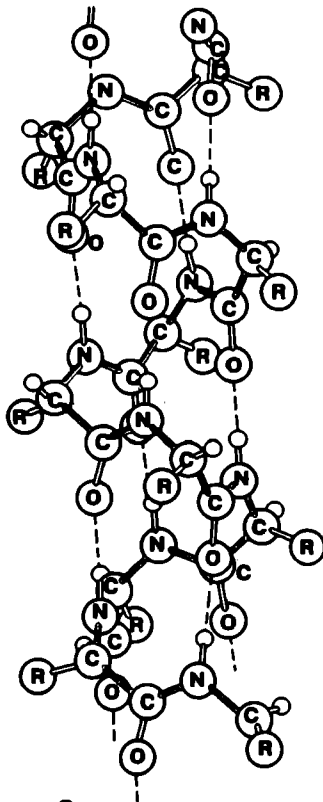
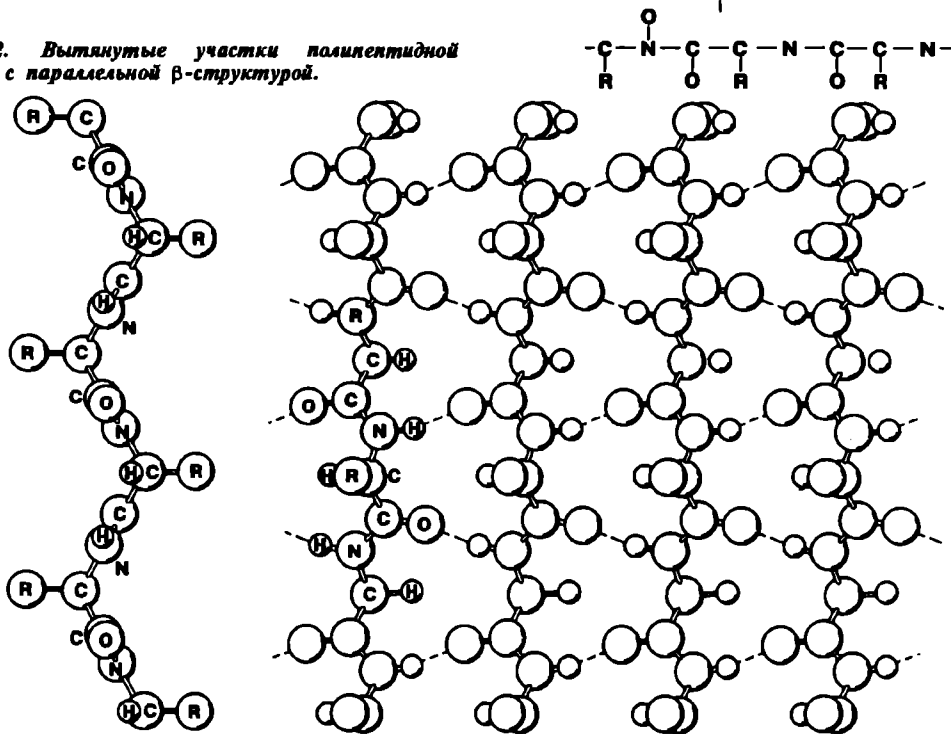


Рис. 1. Участок полипептидной цепи, свернутой в  $\alpha$ -спираль. Ход полипептидной цепи показан цветом.

Рис. 2. Вытянутые участки полипептидной цепи с параллельной  $\beta$ -структурой.





Сворачиваясь в пространстве, полипептидная цепь часто образует и более крупные компактные области с характерной вторичной структурой, называемые доменами, которые соединяются между собой нерегулярными участками цепи. Доменную структуру белковой молекулы называют **третичной структурой** белка. Относительно простые молекулы белков состоят из одной полипептидной цепи, имеющей характерную вторичную и третичную структуру. Более сложные белки могут содержать несколько одинаковых или разных таких образований (называемых субъединицами), которые часто располагаются в молекуле более или менее симметрично. В этом случае говорят о **четвертичной структуре** белковой молекулы.

#### ЗАЧЕМ НУЖНЫ КРИСТАЛЛЫ БЕЛКОВ

Все молекулы каждого конкретного белка строго идентичны и поэтому при определенных условиях могут образовывать настоящие монокристаллы, размеры которых достигают 0.3—0.5 мм (рис. 3). В отличие от других кристаллов кристаллы белков, содержат около 50% жидкости и существуют только в равновесии с маточным раствором, однако это не мешает им быть достаточно совершенными, чтобы давать очень богатую картину дифракции рентгеновских лучей с десятками тысяч дифракционных отражений. Измерения интенсивностей этих отражений и служат экспериментальной основой в определении пространственной структуры белковых молекул. Вырастить кристаллы белков совсем не просто, но если для какого-либо конкретного белка удается получить такие кристаллы, то становится возможным детальное изучение пространственной структуры этого белка методом рентгеноструктурного анализа.

Для измерений интенсивностей рентгеновских дифракционных отражений от белковых кристаллов разработаны специальные многоканальные рентгеновские дифрактометры. Они позволяют регистрировать одновременно большее число отражений.

Один из таких дифрактометров был создан в Институте кристаллографии совместно с Лабораторией высоких энергий ОИЯИ (Дубна) по инициативе и при активной поддержке Вайнштейна (рис. 4). Кроме генераторов рентгеновских лучей с вращающимся анодом в последнее время все шире используется более мощное синхротронное рентгеновское излучение, что ускоряет эксперимент в десятки раз и позволяет получать результаты с более высоким пространственным разрешением. Обработка экспериментальных данных, расчеты электронной плотности в кристаллах, определение и уточнение координат десятков тысяч атомов в белковой молекуле требуют применения самых производительных современных компьютеров, при этом очень важную роль играют средства интерактивной компьютерной графики.

В Институте кристаллографии РАН, в лаборатории структуры биокристаллов, созданной Борисом Константиновичем Вайнштейном в 1958 г., под его руководством исследованы пространственные структуры более 20 белков. Ниже приведены результаты исследования некоторых из них.

#### ЛЕГГЕМОГЛОБИН

Появление кислорода в земной атмосфере привело к возникновению живых организмов, его использующих и имеющих белки, которые способны связывать и переносить молекулярный кислород. К числу последних относятся миоглобин и гемоглобин, содержащие гем (относительно небольшое соединение протопорфирина с атомом железа, которое встраивается в молекулу белка в процессе ее сборки). Атом железа гема и служит местом связывания молекулы кислорода в этих белках. Долгое время считалось, что подобные белки есть только у животных. Однако в 1939 г. в корневых клубеньках бобовых растений был обнаружен белок со спектральными характеристиками, близкими к гемоглобину. Этот белок позднее получил название леггемоглобин. Выяснилось,

что он связывает и переносит кислород, необходимый при синтезе АТФ, а также обеспечивает низкое парциальное давление кислорода в клубеньках растений. Леггемоглобины интенсивно изучались во многих биохимических лабораториях мира. Величина молекулярной массы белка (17 000) и некоторые другие данные позволяли думать, что этот белок гомологичен по пространственной структуре миоглобину и мономерным гемоглобинам.

В Институте кристаллографии исследования леггемоглобина желтого люпина проводились<sup>2</sup> начиная с 1972 г.

Молекула леггемоглобина представляет собой мономер, содержащий 153 аминокислотных остатка. Ход полипептидной цепи приведен на рис.5. Молекула содержит 8  $\alpha$ -спиралей, которые чередуются с межспиральными нерегулярными переходами. Между спиралями E и F расположен гем, присоединенный к белку координационной связью атома железа с атомом азота близко расположенного аминокислотного остатка, так называемого проксимального гистидина. Все гемоглобины способны обратимо связывать молекулу кислорода, но отличительная особенность леггемоглобинов — необыкновенно высокое сродство к кислороду (в 10—24 раз выше, чем у гемоглобинов животных). Чтобы выяснить причины такого необычного поведения, были изучены дезоксигемоглобин (без молекулы кислорода) и оксигемоглобин (с молекулой кислорода)<sup>3</sup>.

Оказалось, что в дезоксигемоглобине проксимальный гистидин подвижен и может находиться в одной из двух ориентаций, а атом железа отклоняется от плоскости гема на 0.30 Å). При образовании комплекса с кислородом в оксигемоглобине атом железа перемещается в плоскость гема. Высокая скорость образования комплекса с молекулой кислорода

может быть объяснена подвижностью проксимального гистидина и гистидина, находящегося в гемовом кармане (дистального гистидина). Леггемоглобин имеет и другие функциональные особенности. Например, этот белок способен связывать не только кислород, но и относительно крупные молекулы: никотиновую кислоту и изохинолин. Структуры этих комплексов также были изучены методом рентгеноструктурного анализа. Было показано, что при этом дистальный гистидин выходит из гемового кармана, освобождая тем самым пространство для размещения связываемой молекулы.

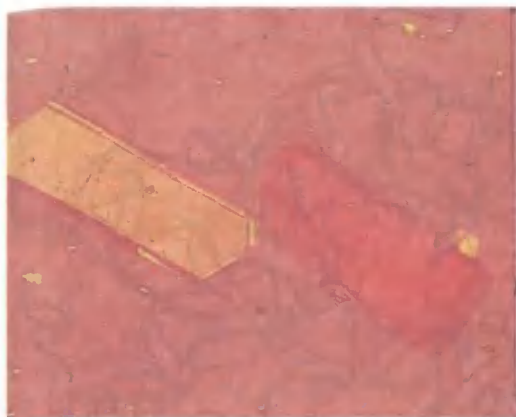
Использование в настоящее время синхротронного излучения для исследования структур белков, а также высокое качество кристаллов леггемоглобина позволяет получать экспериментальные данные с очень высоким разрешением (1.0 Å). Это открывает возможность изучать тонкие изменения в структуре белка при переходе из одного функционального состояния в другое, например при переходе атома железа гема из низкоспинового в высокоспиновое состояние.

#### РИБОНУКЛЕАЗЫ

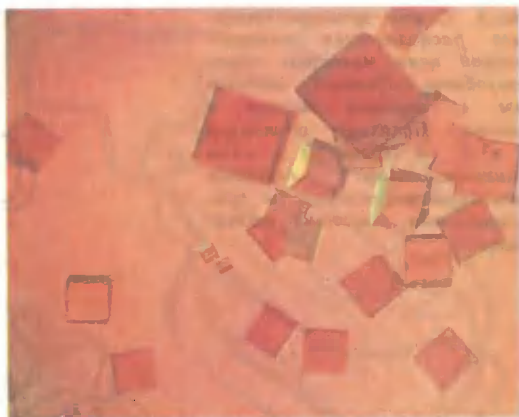
Рибонуклеазы — ферменты, разрезающие молекулы рибонуклеиновых кислот (РНК) на отдельные фрагменты и играющие важную роль в метаболизме. В лаборатории структуры биокристаллов исследован ряд рибонуклеаз микроорганизмов. Это белки небольшого молекулярного веса (около 11 000), содержащие 105—110 аминокислотных остатков. Рибонуклеазы микроорганизмов имеют гуаниловую специфичность, т.е. узнают гуаниловый нуклеотид (одно из четырех оснований, входящих в состав молекул РНК и ДНК) и разрывают фосфатно-сахарную цепочку РНК между гуаниловым и следующим за ним нуклеотидом. В последние 10 лет в различных лабораториях мира успешно идут работы по изучению структур рибонуклеаз микробного и грибного происхождения. Сейчас известны структуры 11 таких белков,

<sup>2</sup> Арутюнян Э.Г. // Молекуляр. биология. 1981. Т.11. № 1. С.27—44.

<sup>3</sup> Harutyunyan E.H., Safonova T.N., Vainsheln B.K. et al. // J. Mol. Biol. 1995. V.251. P.104—115.



**Рис.3.** Кристаллы белков: слева — кристаллы гемоглобина, справа — кристаллы каталазы *Penicillium vitale*.



**Рис.4.** Автоматический рентгеновский дифрактометр КАРД-6 с позиционно-чувствительным двумерным детектором. Слева на приборе — пропорциональная камера, ориентирующая кристалл, а также поворачивающий и наклоняющий первичный пучок рентгеновских лучей.

пять из которых были определены в нашей лаборатории. Это грибные рибонуклеазы Ap1, C2, Pb1, Th1 и бактериальная рибонуклеаза Vi. Кристаллографические данные были получены для этих ферментов не только в свободном состоянии, но также и для их комплексов с неорганическим сульфатом и аналогами субстрата, что позволяет моделировать промежуточное состояние ферментов в ходе реакции. Все структуры были определены и уточнены по эксперименталь-

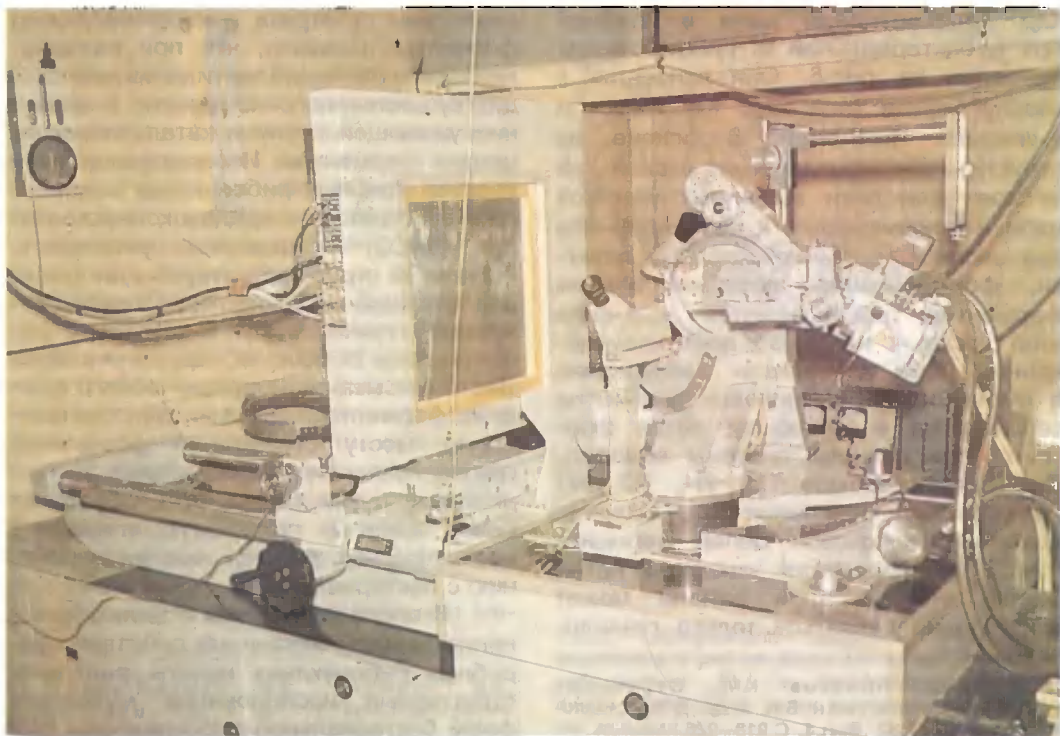
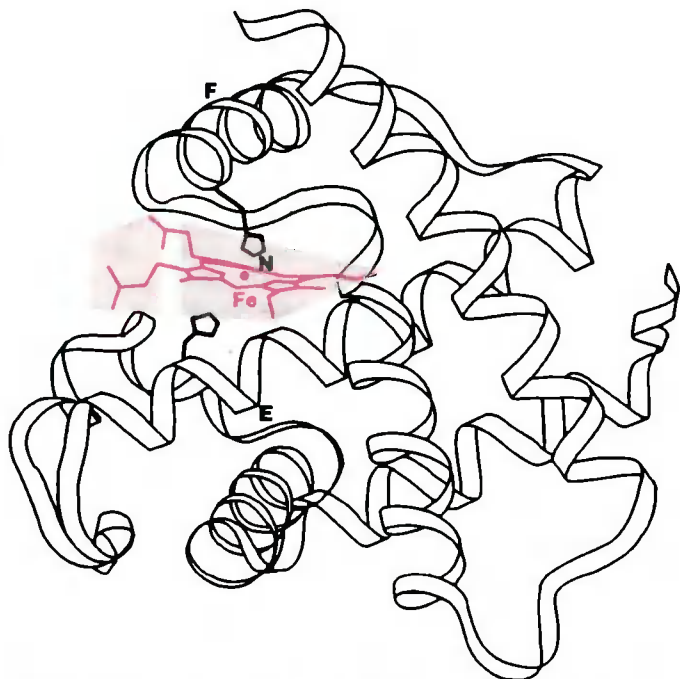


Рис. 5. Схема пространственного расположения полипептидной цепи молекулы легкого гемоглобина. Цветом выделен гем с атомом железа в центре. Показаны  $\alpha$ -спирали E и F и связанные с ними аминокислотные остатки дистального (нижний) и проксимального (верхний) гистидинов.



ным данным высокого или сверхвысокого разрешения<sup>4</sup> (2—1 Å).

Все гуанил-специфичные рибонуклеазы имеют похожее строение. Ход полипептидной цепи в грибной Ar1 и бактериальной Vi рибонуклеазах приведен на рис.6. Они относятся к классу белков типа  $\alpha\beta$ , т.е. имеют и  $\alpha$ -спирали и  $\beta$ -слои. В основе их структуры — скрученный  $\beta$ -слой из четырех или пяти вытянутых участков цепи и примыкающие к нему одна или две  $\alpha$ -спирали. Аминокислотные остатки, формирующие активные центры ферментов, располагаются в  $\beta$ -слое или близко к нему. Во всех исследованных нами комплексах рибонуклеаз с нуклеотидами гуаниловый нуклеотид связывается в узнающей петле фермента при помощи системы водородных связей атомов O6, N1, N2, N7 гуанилового основания с атомами основной и боковых цепей фермента (рис.7.). Конформация узнающей петли такова, что в этом районе может эффективно связаться только гуанило-

вый нуклеотид, чем и обусловлена высокая специфичность этих ферментов.

Сравнение структур рибонуклеаз в свободном состоянии и их комплексов с аналогами субстрата и неорганическим фосфатом показало, что при связывании гуанилового нуклеотида не происходит существенного изменения в строении узнающей петли и каталитического центра ферментов. Исследование комплексов грибных рибонуклеаз с аналогом субстрата — тридезоксинуклеотидом (dACG) — позволило установить, что в этих структурах отсутствует место для связывания нуклеотида, предшествующего гуаниловому. В структуре рибонуклеазы Vi было обнаружено второе место связывания неорганического фосфата ферментом. Видимо, оно соответствует месту связывания фосфатной группы нуклеотида, следующего за гуаниловым нуклеотидом, что объясняет более высокую гуаниловую специфичность грибных рибонуклеаз по сравнению с бактериальными.

В последнее время с целью выяснения деталей механизма действия микробных рибонуклеаз начаты рентгеноструктурные исследования мутантных форм бактериальной рибонуклеазы Vi с

<sup>4</sup> См., напр.: Поляков К.М., Строкопытов Б.М., Вайнштейн Б.К. и др. // Кристаллография. 1987. Т.32. Вып.4. С.918—926.

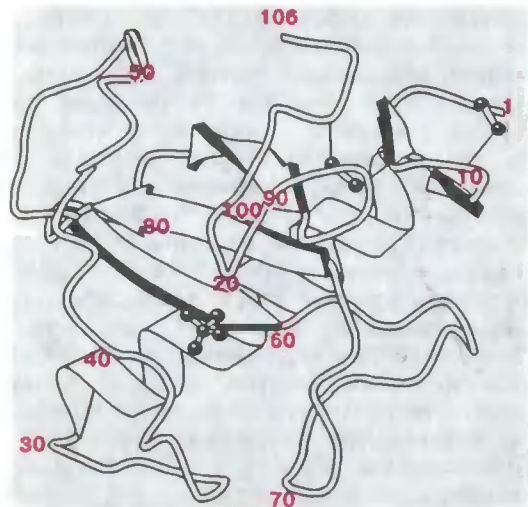
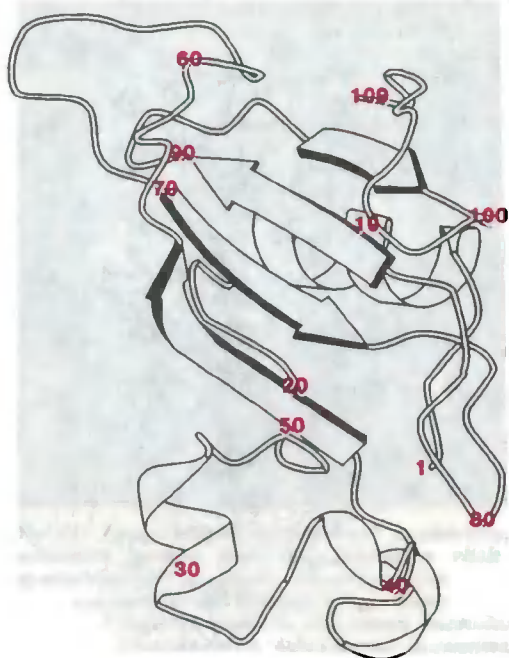


Рис.6. Ход полипептидной цепи в молекулах грибной Ap1 (слева) и бактериальной Vi (справа) рибонуклеазы. Вдоль цепи указаны номера каждого десятого аминокислотного остатка, стрелки обозначают участки с  $\beta$ -структурой.



искусственно замененными остатками в активном центре фермента.

### КАТАЛАЗА

Каталаза — фермент, осуществляющий разложение перекиси водорода на воду и молекулярный кислород в клетках почти всех живых организмов. Основная физиологическая роль каталазы — защита компонентов живой клетки от повреждающего действия перекиси водорода, выделяющейся в различных реакциях обмена веществ. В настоящее время выделены и биохимически изучены более 50 каталаз из бактерий, дрожжей, грибов, растений и животных. Однако пространственные структуры определены только для шести каталаз из разных видов организмов, причем три из них — в Институте кристаллографии. В качестве примера приведем пространственную структуру каталазы *Penicillium vitale*<sup>5</sup>.

Молекула этой каталазы имеет мо-

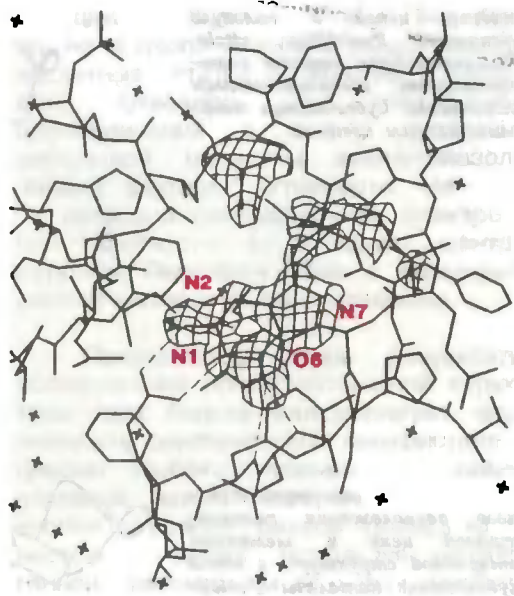


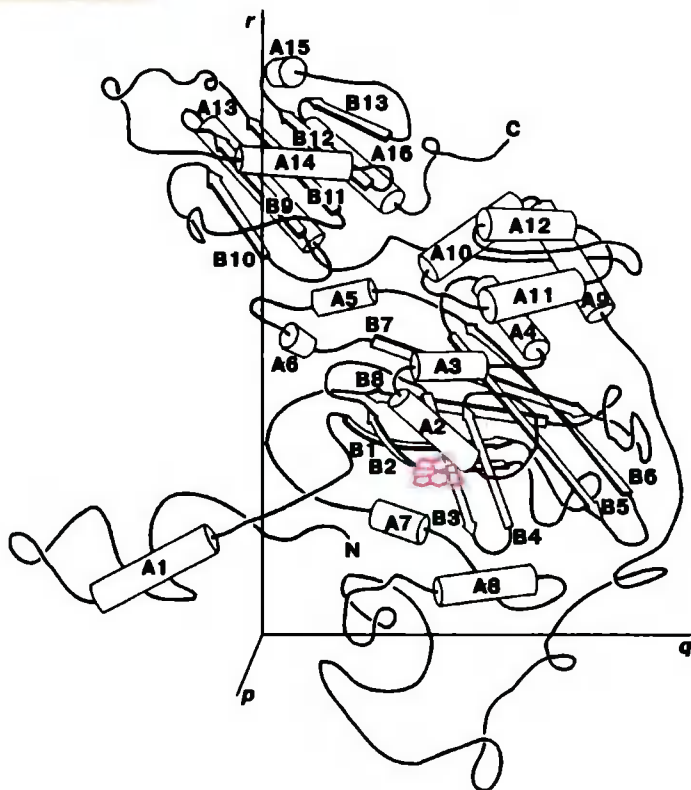
Рис.7. Изображение области электронной плотности в районе узлающей петли комплекса рибонуклеазы Pв1 с тридезоксинуклеотидом dACG. Водородные связи показаны пунктирными линиями.

<sup>5</sup> Мелик-Адамян В.Р., Барынин В.В., Вайнштейн Б.К. и др. // Кристаллография. 1987. Т.32. Вып.3. С.638—652.



Рис. 8. Расположение полипептидных цепей в молекуле каталазы *Penicillium vitale*. Прямолинейные отрезки соответствуют аминокислотным остаткам. Субъединицы показаны разным цветом.

Рис. 9. Схема пространственного расположения полипептидной цепи и элементов вторичной структуры в одной субъединице каталазы *Penicillium vitale*. Цилиндры соответствуют спиральям, стрелки — вытянутым участкам в слоях с  $\beta$ -структурой. Гем показан цветом;  $r$ ,  $q$ ,  $g$  — оси симметрии, связывающие четыре идентичные субъединицы в молекуле.



лекулярную массу 300 000. Она состоит из четырех идентичных полипептидных цепей, образующих четыре субъединицы, которые связаны в пространстве тремя взаимно перпендикулярными осями симметрии второго порядка и сложным образом переплетены друг с другом (рис.8). Каждая субъединица содержит 670 аминокислотных остатков; пространственное расположение элементов вторичной структуры в субъединице показано на рис.9. Видно, что, начиная с N-конца, после небольшого выступающего участка, по ходу цепи можно выделить три компактных домена с характерной вторичной структурой, обозначаемой как  $\alpha+\beta$ ,  $\alpha$  и  $\alpha/\beta$ . Первый, наибольший домен содержит два расположенных рядом  $\beta$ -слоя из четырех антипараллельных участков цепи каждый и семь  $\alpha$ -спиралей. Второй домен намного меньше и состоит из четырех  $\alpha$ -спиралей, которые расположены рядом со спиральями первого домена.

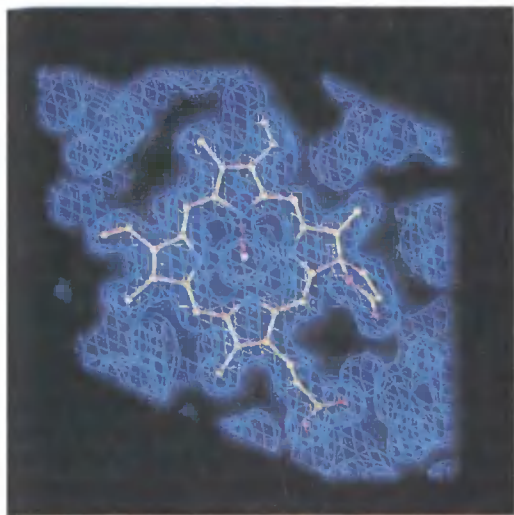


Рис.10. Распределение электронной плотности вокруг гема d в каталазе *Penicillium vitale*.

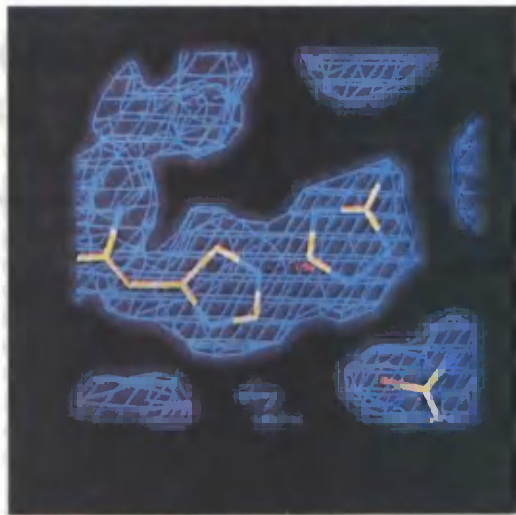


Рис.11. Распределение электронной плотности в активном центре каталазы *Penicillium vitale* с присоединенной молекулой аминотриазола. Молекула аминотриазола (справа) ковалентно связывается с аминокислотным остатком гистидина (слева) и препятствует активности фермента.

Третий, С-концевой домен, содержит  $\beta$ -слой из пяти параллельных участков, которые чередуются с четырьмя спиралями.

В первом домене расположен гем, который, в отличие от гемов в других белках, в каталазе *Penicillium vitale* находится в модифицированном состоянии. Это было известно из спектроскопических исследований данной каталазы, однако абсолютную конфигурацию этого модифицированного гема, гема d, удалось определить только после анализа электронной плотности<sup>6</sup> (рис.10). Каталитический, или активный, центр фермента, где и происходит химическая реакция разложения перекиси водорода, находится рядом с гемом. Таких центров в молекуле каталазы четыре, по одному в каждой субъединице. Расстояние между ними — 30–40 Å, и находятся они глубоко внутри на расстоянии 17 Å от поверхности молекулы. Диффузия молекул перекиси водорода к активным центрам каталазы облегчается наличием в молекуле каналов, ведущих к этим центрам. Анализ

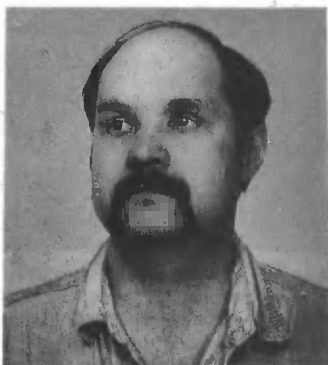
пространственной структуры активного центра показал, что в ферментативной реакции участвует не только гемогруппа, но и расположенные рядом аминокислотные остатки аспарагина и гистидина. Оказалось, что ковалентное присоединение к этому гистидину небольшой молекулы аминотриазола лишает фермент активности. На рис. 11 показано распределение электронной плотности в активном центре каталазы *Penicillium vitale* с присоединенной молекулой аминотриазола.

Приведенные здесь результаты исследований пространственной структуры трех белков иллюстрируют возможность рентгеновской биокристаллографии глубоко проникать в тайны строения живой материи. Детальное знание строения белков позволяет в настоящее время, используя методы геной инженерии и создавая искусственные мутанты бактерий, целенаправленно заменять выбранные аминокислотные остатки в белках. Тем самым изменяются физико-химические свойства белковых молекул, что открывает новые горизонты для фундаментальных и прикладных исследований белков.

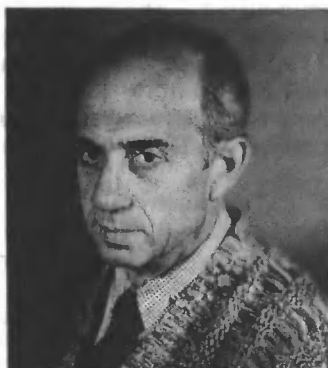
<sup>6</sup> Murshudov G.N., Vainshtein B.K., Fita I. et al. // J. Biol. Chem. 1996. V.271. № 15. P.8863–8868.

# Малоугловое рассеяние: взгляд на строение нативных биополимеров

Д. И. Свергун, Л. А. Фейгин



*Дмитрий Иванович Свергун, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории малоуглового рассеяния Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН. Занимается разработкой методов анализа данных малоуглового рассеяния, исследованиями структуры биополимеров в растворе.*



*Лев Абрамович Фейгин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией малоуглового рассеяния. Область научных интересов — малоугловое рассеяние объектами различной природы, строение тонких органических пленок. Заслуженный деятель науки Российской Федерации.*

**Ч**ЕМ БОЛЬШЕ размер рассеивающего объекта, тем в меньшем угловом интервале сосредоточено рассеянное излучение, и рассеяние на малые углы (меньше нескольких градусов) несет информацию о «крупномасштабном» (по отношению к длине волны излучения  $\lambda$ ) рассеивающем ансамбле. В структурном анализе вещества с помощью рентгеновского и нейтронного рассеяния  $\lambda \approx 0.1$  нм, что по порядку величины совпадает с межатомными расстояниями. Малоугловое рассеяние (МУР), таким образом, не «видит» отдельных атомов, но позволяет судить о надатомной структуре вещества (о том, как располагаются конгломераты из множества атомов) с разрешением 1—100 нм. Например, идеальный неорганический кристалл с десятком атомов в элементарной ячейке не вызывал бы МУР; в реальных кристаллах оно возникает, например, за счет присутствия кластеров (скоплений) дефектов. И так, уже само по себе наличие или отсутствие МУР может служить структурной характеристикой вещества.

Основная область применения МУР — изучение надатомного строения частично или полностью разупорядоченных систем. Метод широко используется в физике конденсированного состояния, физике и химии полимеров, материаловедении, молекулярной биологии и других областях науки. С помощью МУР удастся находить объем и форму субмикроскопических частиц (например, биологических макромолекул или включений новой фазы в твердом растворе), устанавливать рас-



пределение частиц по размерам в сложных системах, определять шероховатость поверхности и др.<sup>1</sup>

Экспериментальная регистрация упругого рассеяния в ближайшей окрестности первичного пучка — задача, требующая специальной аппаратуры. Современные малоугловые дифрактометры позволяют измерять рассеяние начиная с сотых долей градуса. В качестве источников излучения в большинстве лабораторий служат рентгеновские трубки, а в специализированных центрах используют синхротронное излучение и тепловые нейтроны.

При исследовании биологических макромолекул, когда изучается структурный механизм их функционирования, метод МУР особенно ценен своей возможностью анализировать нативные биополимеры в растворе. Таким образом строение макромолекул определяется в условиях, максимально приближенных к физиологическим (тогда как белковая кристаллография применима лишь к закристаллизованным объектам); кроме того, можно исследовать структурные перестройки, вызванные изменением этих условий. Поэтому неудивительно, что в организованной Б.К.Вайнштейном лаборатории структуры биокристаллов наряду с кристаллографическими исследованиями вскоре было начато изучение строения биологических объектов (белков, нуклеиновых кислот, бактериальных вирусов) в растворе методом МУР. Широта научных интересов создателя лаборатории проявилась и во всестороннем охвате проблемы — от разработки малоугловых дифрактометров (в том числе первого в мире автоматического) до развития методов обработки и интерпретации экспериментальных данных.

#### СФЕРИЧЕСКОЕ УСРЕДНЕНИЕ — СФЕРИЧЕСКИЕ ГАРМОНИКИ

Когда излучение рассеивают идентичные частицы, ориентированные

хаотически, свой вклад вносят все ориентации, и картина рассеяния оказывается сферически симметричной. Экспериментально измеряемая интенсивность малоуглового рассеяния макромолекулами в разбавленном растворе пропорциональна интенсивности рассеяния одним объектом, усредненной по всем его ориентациям. Такое усреднение называется сферическим. В результирующем выражении для интенсивности рассеяния  $I$  как функции модуля вектора рассеяния  $s$  ( $s=4\pi \sin\theta/\lambda$ ;  $2\theta$  — угол рассеяния) структура частицы представлена ее эффективной рассеивающей плотностью  $\rho(r)$ , т.е. разностью рассеивающих плотностей частицы и растворителя. Рассеяние на нулевой угол пропорционально квадрату контраста  $\Delta\rho$  (среднего значения эффективной плотности в частице).

Хаотическая ориентация частиц приводит к существенной потере информации по сравнению с изучением макромолекулярных кристаллов. Вместо трехмерного набора из тысяч кристаллографических рефлексов в малоугловом рассеянии от растворов измеряются изотропные, т.е. одномерные, кривые рассеяния. Согласно теории случайных процессов, минимальное число параметров, достаточных для представления кривой МУР от частицы с максимальным размером  $D_{\max}$  в аналитическом виде как функции  $s$  в интервале аргумента  $[s_{\min}, s_{\max}]$ , составляет  $N_s = D_{\max}(s_{\max} - s_{\min})/\pi$ . На практике величина  $N_s$  редко превышает 10—15.

Тем не менее, кривые малоуглового рассеяния растворами макромолекул оказались весьма чувствительными к форме рассеивающих частиц<sup>2</sup>. Следовательно, информация о трехмерной структуре в экспериментальных данных заложена, вопрос заключается в том, как ее извлечь. На протяжении многих лет единственной возможностью был метод проб и ошибок: кривую рассеяния пытались «угадать»,

<sup>1</sup> Свергун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М., 1986.

<sup>2</sup> Фейгин Л.А. // Кристаллография. 1971. Т.16. С.711—714.

рассчитывая рассеяние на модельных телах, построенных на основе априорной информации об исследуемой частице. Естественно, что такая процедура носила субъективный характер; более того, само по себе согласие расчетной кривой с экспериментом не гарантировало единственности построенной модели.

Очевидно, что в общем случае однозначное восстановление трехмерной структуры частицы по одномерной кривой МУР невозможно. С неоднозначностью интерпретации можно бороться, как делая предположения о искомой структуре *a priori*, так и выбирая математический аппарат, позволяющий адекватно описывать надатомное строение частицы возможно меньшим числом параметров. Таким аппаратом оказалось разложение по сферическим гармоникам  $Y_m(\omega)$  — специальным функциям, периодичным на поверхности сферы (здесь  $\omega$  обозначает телесный угол). Представление рассеивающей плотности в виде ряда

$$\rho(r) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \rho_{lm}(r) Y_{lm}(\omega), \quad (1)$$

позволяет записать интенсивность малоуглового рассеяния как сумму<sup>3</sup>

$$I(s) = 2\pi^2 \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l |A_{lm}(s)|^2, \quad (2)$$

где парциальные амплитуды  $A_{lm}(s)$  выражаются через радиальные функции  $\rho_{lm}(r)$  с помощью линейного интегрального преобразования. Важнейшее достоинство такого представления — отсутствие в (2) перекрестных членов: мультипольные составляющие рассеивающей плотности  $\rho_{lm}$  из (1) вносят аддитивный вклад в интенсивность рассеяния. Это позволяет создавать эффективные численные алгоритмы определения рассеивающей плотности. В частности, таким методом по

данным малоуглового рассеяния<sup>4</sup> впервые удалось получить карту электронной плотности биологического объекта (бактериального вируса Т7) в предположении аксиальной симметричности его структуры. Использование сферических гармоник составляет основу современных методов интерпретации данных малоуглового рассеяния биополимерами, о чем пойдет речь дальше.

#### ОДНОРОДНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ — ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ

При построении структурной модели низкого разрешения вполне естественно допустить, что рассеивающая плотность частицы постоянна. В методе проб и ошибок форма частицы «набивалась» шарами малого диаметра и одинаковой плотности, а количество модельных параметров (координат центров шаров) исчислялось сотнями и тысячами. Сферические гармоники обеспечивают гораздо более экономичное представление однородных моделей и тем самым позволяют строить прямые методы определения формы.

Форма частицы с достаточной общностью описывается двумерной функцией оболочки  $r=F(\omega)$ , задающей для каждого углового направления  $\omega$  расстояние от центра до границы частицы. Функция  $\rho(r)$  для однородной частицы равна единице внутри этой оболочки и нулю за ее пределами. Форму оболочки  $F(\omega)$  можно представить в виде ряда по сферическим гармоникам с комплексными коэффициентами  $f_{lm}$ :

$$F(\omega) \approx F_L(\omega) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=-l}^l f_{lm} Y_{lm}(\omega). \quad (3)$$

Это представление тем точнее, чем больше членов ряда мы возьмем, т.е. пространственное разрешение  $\delta r$  характеризуется параметром обрыва

<sup>3</sup> Stuhmann H.B. // Acta Cryst. 1970. V.A26. P.297—306.

<sup>4</sup> Вайнштейн Б.К., Фейгин Л.А., Свергун Д.И., Вагин А.А. Использование симметрии в структурном анализе биологических макромолекул // Кристаллография и кристаллохимия. М., 1986. С.91—104.

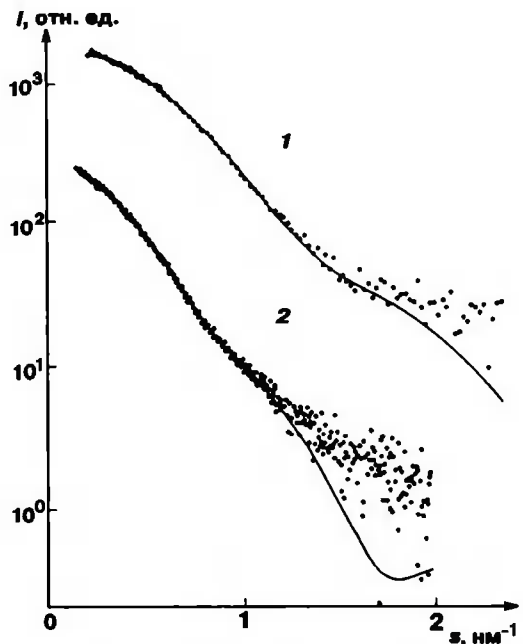


Рис. 1. Экспериментальные кривые малоуглового рентгеновского рассеяния гексогеназой (1) и обратной транскриптазой (2) и рассеяние моделями, построенными прямым методом (сплошные линии).

ряда  $L$ :  $\delta r = \pi R_0 / (L+1)$ , где  $R_0$  — радиус эквивалентной по объему сферы. Трехмерная структура частицы задается, таким образом, с помощью  $N_p = (L+1)^2 = 6$  независимых параметров — коэффициентов  $f_{lm}$  (уменьшение на шесть параметров обусловлено произвольностью положения частицы).

Мы разработали<sup>5</sup> методы быстрого расчета интенсивности рассеяния  $I(s)$  с использованием формул (1—3) и алгоритм прямого определения формы частицы путем минимизации невязки между экспериментальной и расчетной кривой рассеяния. Анализ единственности решения<sup>6</sup> показал, что при  $N_p \leq 1.5N$ , достигается однозначное и устойчивое к случайным ошибкам и начальному приближению восстановление формы. На практике это означает возможность определения *ab initio* строения частиц, форма которых удов-

<sup>5</sup> Svergun D.I., Stuhrmann H.B. // Acta Cryst. 1991. V.A47. P.736—744.

<sup>6</sup> Svergun D.I., Volkov V.V., Kozin M.B., Stuhrmann H.B. // Acta Cryst. 1996. V.A52. P.419—426.

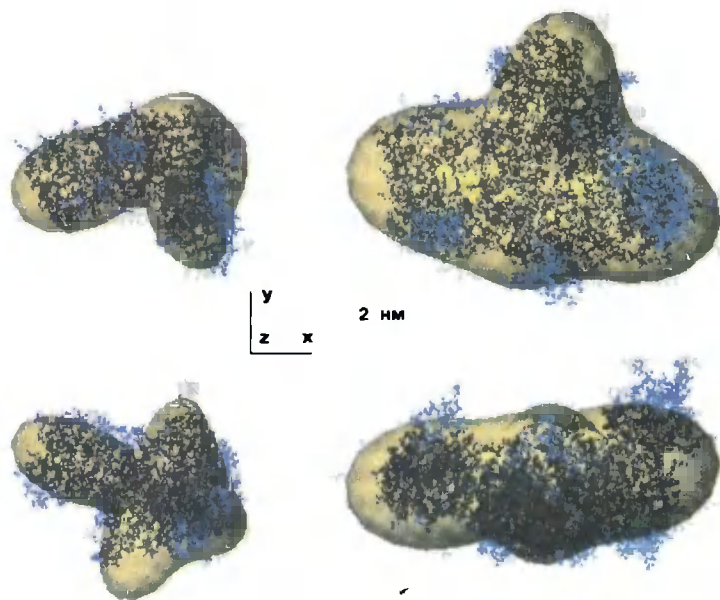


Рис. 2. Сравнение восстановленных форм (прозрачных оболочек при  $L=4$ , что соответствует пространственному разрешению  $\delta r \approx 2$  нм) с атомными структурами и белкового банка данных (точки). Слева — гексогеназа, справа — обратная транскриптаза. Нижние формы повернуты вокруг оси  $X$  на  $90^\circ$  по часовой стрелке.

летворительно представляется конечным рядом с  $L=4$  (например, глобулярных белков) при разрешении 1—5 нм.

Для проверки описанной методики по экспериментальным кривым рассеяния была восстановлена форма различных белков с известной атомной структурой. Приведенные на рис.1 и 2 примеры дают представление о разрешении, которое достигается прямым восстановлением формы по данным МУР. Развитый метод был успешно использован для анализа строения различных белков с неизвестной пространственной структурой — семейства пируват декарбоксилаз, FKBP25гетт, амилазы,  $\sigma 54$ -фактора и др. — и широко применяется в настоящее время.

#### СТРОЕНИЕ РИБОСОМЫ — ВАРИАЦИЯ КОНТРАСТА

Однородное приближение допустимо при исследовании однокомпонентных частиц (в частности, белков в водных растворах), однако недостаточно обосновано для частиц, состоящих из нескольких компонентов с различной рассеивающей плотностью. Классическим объектом такого рода является рибосома — сложный биологический комплекс, ответственный за синтез белка в клетке. Прокариотические (70S) рибосомы имеют молекулярную массу около 2300000, диаметр порядка 30 нм и состоят из малой (30S) и большой (50S) субчастиц, каждая из которых представляет собой комплекс белков с рибосомной РНК. Механизм функционирования рибосомы интенсивно исследуют уже более 30 лет с помощью различных структурных методов. В последнее время криогенная электронная микроскопия позволила достичь разрешения 2.5 нм при изучении общей формы рибосомы<sup>7</sup>, однако многие вопросы, в частности вопрос о взаимном расположении белков и РНК в субчастицах, остаются открытыми.

Информации, содержащейся в одной кривой МУР, явно недостаточно для поиска структурной модели такого сложного объекта. Идеальную возможность расширить набор экспериментальных данных предоставляет нейтронное рассеяние с использованием замещения водорода на дейтерий. Дело в том, что хотя химически эти атомы почти эквивалентны, нейтроны рассеиваются на них совершенно по-разному. Поэтому изотопическое замещение H/D не меняет структуры частицы и в то же время позволяет осуществлять так называемую вариацию контраста, причем двумя принципиально различными путями. Во-первых, можно варьировать в широких пределах рассеивающую плотность растворителя (используя  $H_2O/D_2O$  смеси). Во-вторых — выборочно изменять контраст рибосомных компонентов, реконструируя различные гибридные частицы из комбинаций рибосомных составляющих, выращенных в протонированной и дейтерированной средах. Кривые рассеяния, измеренные при разных контрастах, отличаются друг от друга, и их совместный анализ дает информацию как о форме, так и о внутренней структуре рибосомы. В частности, интенсивность МУР четырехкомпонентной системой

$$k(s) = \sum_{n=1}^4 (\Delta\rho_n)^2 I_n(s) + 2 \sum_{n>k} \Delta\rho_n \Delta\rho_k I_{nk}(s) \quad (4)$$

(здесь  $\Delta\rho_n$  и  $I_n(s)$  — контраст и интенсивность рассеяния для  $n$ -ого компонента, а  $I_{nk}(s)$  — перекрестные члены) содержит десять линейно независимых функций, и вариация контраста увеличивает информативность данных МУР в десять раз.

Предложенный нами прямой метод интерпретации данных рассеяния многокомпонентными<sup>8</sup> частицами был применен для исследования 70S рибосомы *E.coli*. Четырехкомпонентная модель рибосомы состояла из оболоч-

<sup>7</sup> Frank J., Zhu J., Penczek P. et al. // Nature. 1995. V.376. P.441—444.

<sup>8</sup> Svergun D.I. // Acta Cryst. 1994. V.A50. P. 391—402.

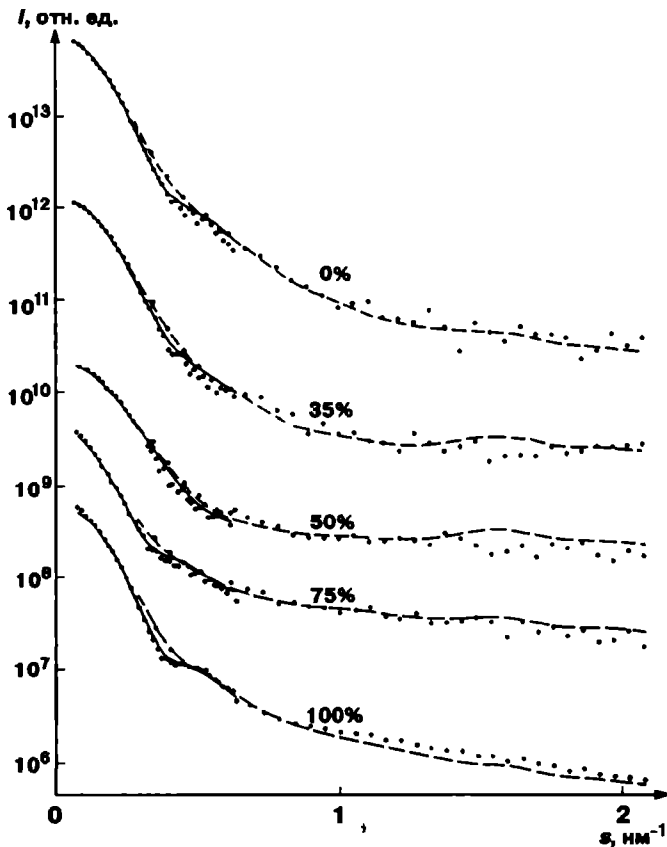


Рис. 3. Экспериментальные данные нейтронного малоуглового рассеяния полностью протонированной 70S рибосомы в растворах с различным процентным содержанием тяжелой воды (указано у кривых) и расчетное рассеяние четырехфазной моделью (соответствующее различным условиям измерения — сплошные и штриховые линии). Каждая следующая кривая сдвинута вниз на один порядок по оси ординат относительно предыдущей.

чек 30S и 50S субчастиц и оболочек, охватывающих области, занятые РНК в каждой из них. Каждая оболочка была представлена рядом (3), что позволяло быстро рассчитывать парциальные амплитуды (т.е. индивидуальные вклады в рассеяние) произвольно расположенных компонентов и далее — интенсивность рассеяния всей частицей по формуле (4). Формы компонентов определялись из условий минимизации отклонения расчетных кривых от экспериментальных по всему набору данных при разных контрастах (42 нейтронных и рентгеновских кривых рассеяния от гибридных селективно дейтерированных рибосом и свободных субчастиц, см. пример на рис.3). Полученная прямым методом модель (рис.4) впервые описывает как форму, так и внутреннюю структуру нативной 70S рибосомы при разрешении 3.5 нм. Она может служить

основой для определения положения структурных фрагментов рибосомы (отдельные белки, транспортная РНК).

#### БЕЛКОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ — МОЛЕКУЛЯРНАЯ ТЕКТНИКА

Метод МУР играет особенно важную роль при изучении макромолекулярных комплексов. Часто встречаются случаи, когда комплекс не кристаллизуется, но удается закристаллизовать и определить атомную структуру отдельных его составляющих (субъединиц). Тогда информацию о взаимном расположении субъединиц в комплексе можно получить из данных МУР с помощью своего рода молекулярной тектоники — моделируя сдвиги и повороты субъединиц друг относительно друга.

Проиллюстрируем идею такого подхода на примере частицы, состоя-

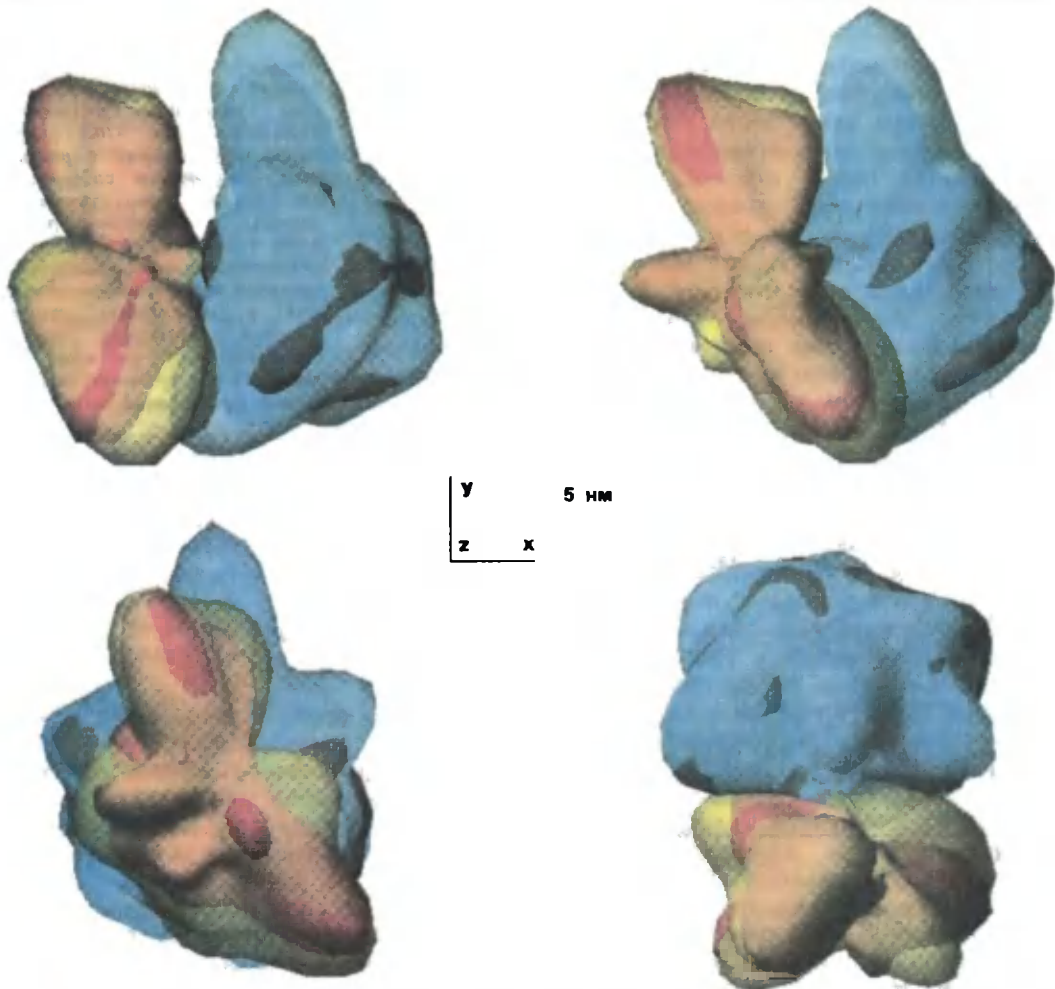


Рис. 4. Четырехфазная модель 70S рибосомы в различных ориентациях. 30S субъединица показана желтым цветом, 50S — синим. Субчастицы изображены полупрозрачными оболочками, что позволяет видеть внутри них области, занятые РНК.

шей из двух субъединиц А и В с известной структурой (что легко обобщается на случай любого числа субчастиц). Пусть парциальные амплитуды рассеяния обеими субчастицами  $A_{lm}(s)$  и  $B_{lm}(s)$  известны. Произвольное взаимное расположение субъединиц можно задать, повернув субъединицу В на эйлеровские углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и сдвинув ее на вектор  $\mathbf{u} = (u, \omega)$ . Парциальные амплитуды повернутой и сдвинутой частицы

$C_{lm}(s)$  аналитически выражаются<sup>9</sup> через ее исходные амплитуды  $B_{lm}(s)$  и позиционные параметры:  $C_{lm}(s) = C_{lm}(B_{lm}, \alpha, \beta, \gamma, \mathbf{u})$ . Аналогично (4) интенсивность рассеяния комплексом  $I_{\text{compl}}(s)$  выражается суммой интенсивностей рассеяния субчастицами (не зависящих от их положения) и перекрестного члена. Последний рассчитывается из амплитуд  $A_{lm}(s)$  и  $C_{lm}(s)$ , и, таким образом,  $I_{\text{compl}}(s) = I_{\text{compl}}(s, \alpha, \beta, \gamma, \mathbf{u})$  будет также зависеть от шести позиционных параметров, которые определяются из условия минимизации невязки между экспериментальной и расчетной кривой рассеяния комплексом. Вместе с

<sup>9</sup> Svergun D.I. // J. Appl. Cryst. 1991. V.24. P.485—492.

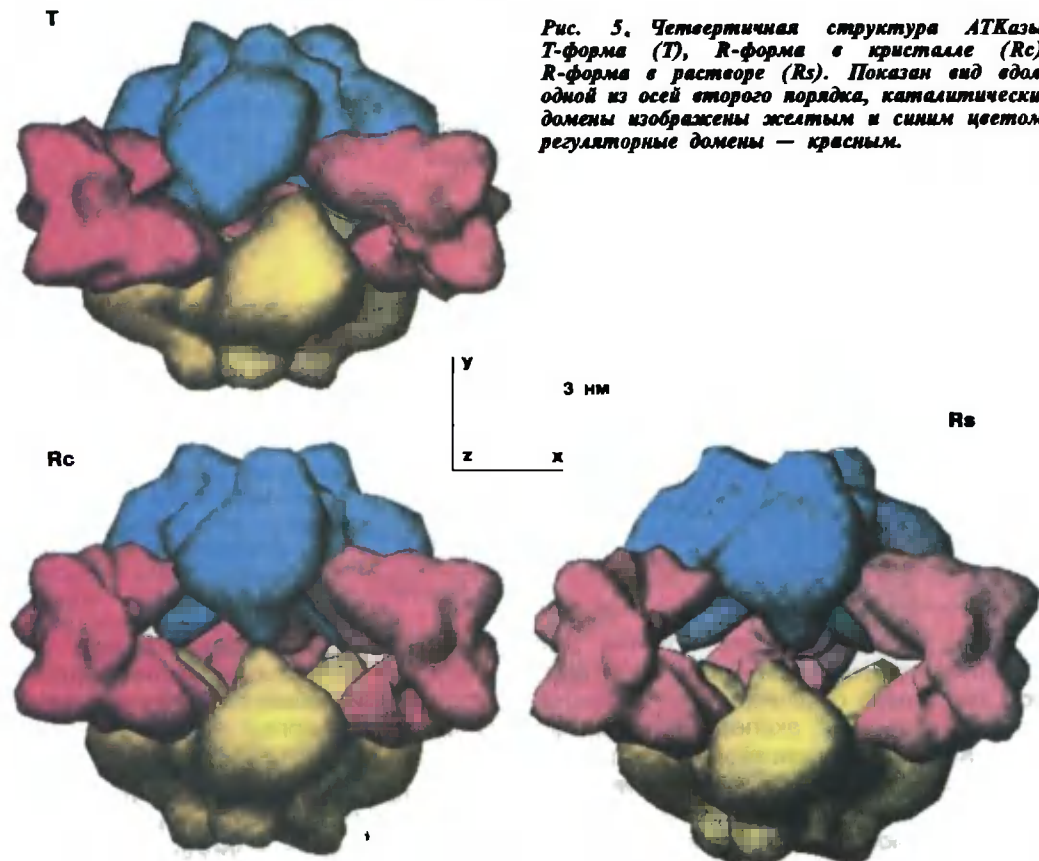


Рис. 5. Четвертичная структура АТКазы: Т-форма (Т), R-форма в кристалле (Rc), R-форма в растворе (Rs). Показан вид вдоль одной из осей второго порядка, каталитические домены изображены желтым и синим цветом, регуляторные домены — красным.

недавно развитым методом расчета амплитуд рассеяния от атомных структур в растворе с учетом гидратной оболочки макромолекул<sup>10</sup> этот подход был успешно использован при исследовании доменной структуры и динамики структурных переходов в пируват декарбоксилазе, энолпирувил трансферазе, гексогеназе, каталазе-пероксидазе и др.

Молекулярная тектоника позволяет также анализировать возможные различия между доменной структурой белков в кристалле и растворе, что иллюстрируется исследованием аспартат транскарбамилазы (АТКазы). Этот фермент с молекулярной массой 306000 состоит из двенадцати субъединиц, организованных в два каталитических тримера и три регуляторных

димера. В учебниках по биохимии наряду с гемоглобином АТКазы служит иллюстрацией классической теории аллостерии, согласно которой функционирование аллостерических ферментов связано с обратимыми структурными переходами между закрытым (Т) и открытым (R) состояниями. Атомные модели АТКазы *E.coli* в обоих этих состояниях были получены ранее с помощью рентгеноструктурного анализа кристаллов<sup>11</sup>. Переход Т→R в кристалле сопровождается увеличением расстояния между тримерами по оси третьего порядка (ось Y на рис.5), их поворотом вокруг этой оси, а также поворотом димеров вокруг осей второго порядка (лежащих в плоскости XZ) — происходит винтовое движение доменов. Для более компактной Т-

<sup>10</sup> Svergun D.I., Barberato C., Koch M.H.J. // J. Appl. Cryst. 1995. V.28. P.768—773.

<sup>11</sup> Kantrowitz E.R., Lipscomb W.N. // Science. 1988. V.241. P.669—674.

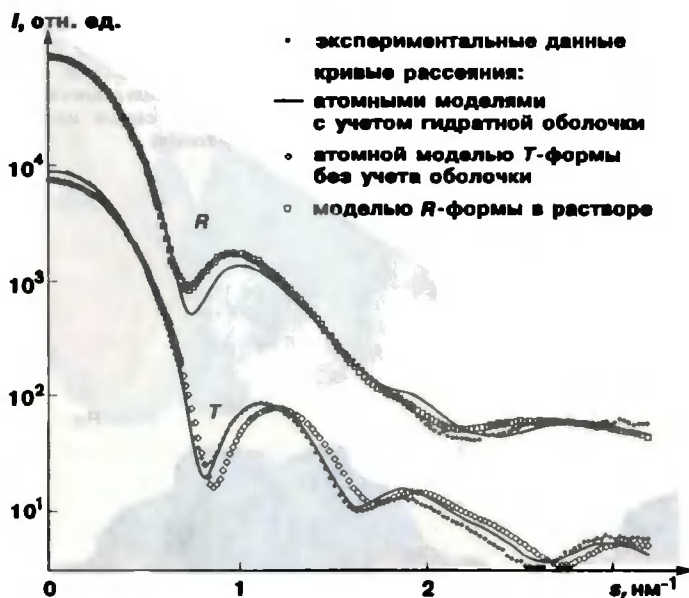


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные кривые рассеяния T- и R-формой АТКазы.

формы рассеяние, рассчитанное для кристаллографической модели с учетом гидратной оболочки, дает хорошее согласие с экспериментальными данными МУР в растворе. Но расчетное рассеяние от кристаллической R-формы существенно отличается от соответствующей малоугловой кривой, что свидетельствует о значительном различии между четвертичной структурой R-формы АТКазы в кристалле и в растворе (рис.6).

Добиться согласия с экспериментальной кривой (рис.6) можно, если продолжить описанное выше винтовое движение доменов, т.е. еще дальше отойти от T-формы в сторону большего открытия структуры)<sup>12</sup>. Соответствующие структурные изменения весьма существенны: получается, что R-форма АТКазы в растворе удалена от компактной T-формы примерно на 50% больше, чем R-форма в кристаллографической модели (рис.5). Напрашивается вывод, что переход T→R в кристалле ограничен силами межмолекулярного кристаллического взаимодействия, которые не позволяют доменам двигаться так, как в природных условиях. Налицо случай, когда кристаллографи-

ческий метод исследования дает искаженные результаты из-за того, что «искусственный» объект изучения отличается от натурального.

Итак, можно сказать, что возможности МУР для изучения строения биологических макромолекул, открывшиеся благодаря новому подходу к анализу данных, уникальны. Например, криогенная электронная микроскопия рибосом, несмотря на более высокое разрешение, не способна «увидеть» рибосомальную РНК и отличить ее от белков. Структурная кристаллография позволяет строить атомные модели макромолекул, однако, как мы видели на примере АТКазы, силы кристаллической упаковки могут существенно влиять на структуру, и использование МУР дает возможность определять строение частиц в естественном окружении. Современное малоугловое рассеяние, таким образом, становится мощным инструментом для изучения нативных биологических макромолекул в растворе и должно рассматриваться как важнейшее дополнение к белковой кристаллографии и электронной микроскопии.

<sup>12</sup> Svergun D.I., Barberato C., Koch M.H.J. et al. // Proteins. 1997. V.27. P.110–117.



Биофизика

**Искусственные антенны для фотосинтеза**

Как известно, в процессе фотосинтеза в реакционных центрах энергия солнечного света преобразуется в химическую. Сами центры — превосходные преобразователи энергии, но они поглощают свет только в узком диапазоне длин волн и с небольшим квантовым выходом. В ходе эволюции в клетках фотосинтезирующих организмов возникла система антенн, собирающих свет во всем видимом диапазоне и передающих приобретенное таким образом возбуждение к центрам фотосинтеза.

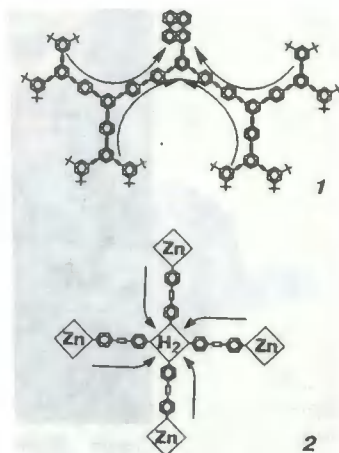
В настоящее время уже созданы искусственные молекулярные системы, способные, подобно фотосинтетическим антеннам, увеличивать активность искусственных реакционных центров фотосинтеза.

Один из видов синтетической молекулярной антенны разработали С. Девадос, П. Барати и Дж. Мур<sup>1</sup>. Антенна похожа на разветвленное дерево с ветвями в виде цепочек фенилацетиленовых хромофоров, исходящих из одного центра — периленового пигмента, первое возбужденное состояние которого имеет низкую энергию.

Кванты света захватываются хромофорами в ультрафиолетовой области спектра. Поскольку в такой антенне уровни энергии первых возбужденных состояний фенилацетиленовых хромофоров по мере удаления от центра возрастают, то за время порядка нескольких пикосекунд энергия возбуждения сливается, «как через воронку», к центру фотосинтеза. При этом эффективное сечение захвата фотонов периленовым центром значительно возрастает, а квантовый выход каждого акта фотопоглощения составляет 0.98.

Другой вид антенны синтезировали Р. Вагнер, Т. Джонсон и Дж. Линдсей<sup>2</sup>. В этой антенне четыре цинксодержащих периферических порфирина связаны с пятым, не содержащим металла, жесткими этиновыми мостиками. Химические связи в такой структуре позволяют сохранять каждому порфирину свою спектроскопическую индивидуальность. В 1994 г. Линдсей и его коллеги создали работающую по такому же принципу «фотонепроводящую проволочку».

Описанные системы, в которых искусственные фотосинтетические центры снабжены искусственными же антеннами, — еще один шаг на пути к лабораторному воспроизведению фотосинтеза.



*Две синтетические антенны, собирающие свет для фотосинтезирующего реакционного центра: 1 — дендритная фенилацетиленовая структура с периленовым ядром; 2 — четыре цинксодержащих тетраарилпорфирина, связанные с центральным порфирином этиносодержащими мостиками. Стрелками показано направление передачи энергии синглетного возбуждения.*

Антенны могут использоваться и как молекулярные преобразователи солнечной энергии, оптические сенсоры, зонды и другие элементы приборов оптоэлектроники. Возможно, привычный рукотворный ландшафт микрочипов вычислительной техники украсится вскоре новыми «деревьями».

<sup>1</sup> Devadoss C., Bharathi P., Moore J.S. // J.Amer. Chem. Soc. 1996. V.118. P.9635—9644.

<sup>2</sup> Wagner R.W., Johnson T.E., Lindsey J.S. // Ibid. P.11166—11180.

Nature. 1996. V.386. № 6620. P.21 (Великобритания).

## Год с росомахами

Б. В. Новиков



Борис Владимирович Новиков, кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Центральной научно-исследовательской лаборатории охотничьего хозяйства и заповедников (ЦНИЛ) Охотдепартамента Минсельхозпрода России. Область научных интересов — ресурсы и рациональное использование охотничьих животных. Монография: «Росомаха» (М., 1993).

**Ц**ЕЛЫЙ год на моем попечении находились два щенка росомачи — зверя, которого нечасто увидишь даже в зоопарке, не то что в природе. Но прежде чем рассказать об их жизни, несколько кратких сведений о росомaxe (*Gulo gulo*) как зоологическом виде.

Хотя обликом она и напоминает медвежонка, относится к семейству куницеобразных (*Mustelidae*) и занимает в нем хорошо обособленный род. С настоящими куницами рода *Martes* росомaxe сближают многие признаки: зубная формула, ряд характеристик в строении черепа, своеобразное «железистое» поле на брюхе, некоторые инстинкты и черты поведения. Росомaxe очень «высоко стоит на ногах» по сравнению со своими сородичами, по существу — это гигантская куница.

Современный ареал росомачи — голарктические области Евразии (к северу от 45° с.ш.) и Северной Америки (выше 35° с.ш.). Места обитания зверя — таежная зона, редколесье и тундра от Скандинавии до восточного побережья Канады.

Численность росомачи (да и не только ее) в Голарктике во многом определяется степенью, если так можно выразиться, «моторизованности» промысла. Охота на мотонартах, легких вертолетах и самолетах, мотодельтопланах сильнее воздействует на численность диких животных, чем любой природный фактор. С развитием легкого снегоходного транспорта росомaxe оказывается практически беспомощной на открытых просторах южной тундры, лесотундры и северной тайги всего ареала и становится легкой добычей охотников.

И в евразийской части ареала, и на Американском континенте насчиты-



*Только что отнятые от мамы.*

*Здесь и далее фото автора*

вается примерно по 20 тыс. росомах. Современное состояние численности этого зверя во всем ареале вида можно считать благополучным. Однако в некоторых местах, например на севере Европы, численность росомахи сокращалась. В Норвегии это побудило отменить премию за уничтоженных животных, а потом и ограничить охоту на них. В Мурманской области всякая охота на росомаху была полностью запрещена с 1985 г. Эти меры, безусловно, сыграют свою положительную роль в восстановлении численности зверя на европейском Севере.

В силу малочисленности росомаха до сего времени остается слабо изученным видом, даже несмотря на интенсивные зоологические исследования в конце прошлого и начале нынешнего столетия. Почти полная библиографическая литература, посвященная росомахе, не превышает 150 источников, а монографии исчисляются

единицами<sup>1</sup>. Естественно поэтому, что изучение вида продолжается. Предпринимаются также попытки восстановления численности размножением росомах в неволе, чтобы впоследствии выпустить потомство в дикую природу — в места исконного обитания. Первые шаги в этом направлении сделал и я, решив начать с воспитания росомашьих щенков.

Они появляются на свет в основном в марте. Но в зависимости от географического положения мест обитания, возраста самок и их индивидуальных биологических особенностей период спаривания и щенение могут быть растянуты больше чем на месяц. Росомаха-мама, готовясь к родам, роет берлогу под поваленным деревом, бугром или в каменной расщелине, лишь бы место было укрыто толстым слоем снега. Вырыв родиль-

<sup>1</sup> См., нап.: Krott P. Der Vielfras (*Gulo gulo* L., 1758). Wildsäugetierte. Jena, 1959; Язан Ю.П. Росомаха. М., 1974; Новиков Б.В. Росомаха. М., 1993.



*Клубок тел, к которому подбирается кот Рефик.*



*Место занятия.*



*Для игры годится все — и обои, и коробка с чаем.*

ную камеру до земли, она расширяет ее до 50—70 см и устилает ложе небольшим количеством ветоши.

К поимке щенков я и мои помощники (охотоведы В.Ермолаев, И.Павлов и В.Никитин) готовились два года. И вот в Ловозерском районе Мурманской области 4 апреля 1991 г. мы извлекли двух малышей из-под двухметрового слоя снега. Всю операцию по отлову провели так, чтобы россомаха смогла уйти в соседний березовый лес.

Щенки — обе самочки — имели отроду почти месяц. Наступала ночь, и мы, не теряя времени, тронулись на мотонартах в Ловозеро. Мчались быстро, почти без отдыха, и к пяти утра следующего дня были в конторе республиканского заказчика. Там я и приступил к обязанностям россомахи-мамы: первым делом помассировал брюшко щенкам, и они охотно пописали, издавая своеобразное урчание. Это были первые звуки, которые я от них услышал. После того как зверьки отправили свою маленькую нужду, мне стало легче на душе: я убедился, что массаж вполне заменяет мамино вылизывание. Теперь наступил момент кормления. Я развел детское питание «Пилти» и стал приучать щенков к соске. С большим трудом удалось влить им граммов по 20—30 корма.

Ночная езда утомила нас, да и щенков тоже, но выспаться не пришлось — за нами прибыла машина из Мурманского охотуправления. Перед дорогой мне удалось влить россомашкам уже граммов по 50—70 корма, и мы покатали в Мурманск. Было радостно за успешно проведенную операцию и грустно, что увозили малышей далеко от их родины.

Часа два они спокойно лежали в искусственном «гнезде» рядом со мной на заднем сиденье. Потом начали возиться. Я поочередно помассировал щенкам животики и, к моему великому удовольствию, они справили уже большую нужду. Не научись я вызывать у щенков естественные отправления, малыши могли бы погибнуть и опыт, почти не начавшись, плачевно закон-

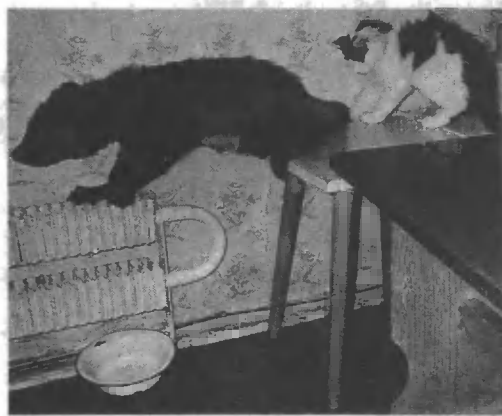
чился бы. Только через несколько дней, уже в Москве, росомашки научились делать все это самостоятельно. Первые, и наиболее ответственные, шаги «доместикации» прошли успешно.

Еще в Мурманске в присутствии многочисленных «свидетелей» — охотников, пришедших посмотреть щенков, мы дали им имена. Не мудрствуя лукаво, разделили родовое название зверя в прежнем написании — россомаха — на два имени. Получились Росса и Маха. Росса была ростом поменьше и весила 1700 г, а Маха — 1900 г. Через остевые и направляющие волосы у щенков просвечивался серо-голубой пух. На темного цвета туловище вырисовывалась ярко выраженная светлая шлея, далеко заходящая на хвост, и тоже светлая маска на мордочке. Уже в Москве, 8 апреля, у щенков прорезались первые зубы — клыки. Значит, моим питомицам исполнился месяц от роду. За клыками сразу же стали прорезаться предкоренные зубы, а через несколько дней и крупные резцы. В общем, развитие зубов шло по классике, как у куниц.

Весь апрель я кормил росомашек из соски. Ели они весьма проворно, ворча и урча. Через неделю их стало не узнать. Малышки по-прежнему получали 3—4-разовое питание и съедали по 80—100 г «Пилти» за кормление, но теперь нетерпение их не знало границ, а спокойно видеть, как рядом ест сестренка, не могла ни одна из них. Пришлось разделять щенков на время кормления. О том, что они готовы к более серьезной пище, чем «Пилти» и всевозможные каши, выяснилось случайно. Мои росомашки жили вместе с котенком, почти ровесником, и Лаймой, щенком западно-сибирской лайки, четырьмя месяцами старше их. Все были друзьями, без конца носились друг за другом по кухне и коридору, устраивали свалку. Однажды из картонной коробки, стоявшей на кухонном столе, вылез цыпленок. Росомашки, услышав его писк, мгновенно остановились и замерли. Не успел я и глазом моргнуть, как Маха



*Сладкий сон.*



*Игра в догонялки.*



*Приготовилась к съемкам.*



*Вместо маминого вылизывания — массаж мокрой салфеткой.*



*Чем пахнет свобода?*



*На прогулке с собакой.*

*Очень привлекательный пень.*



*Кто кого?*



*Что же здесь такое?*



оторвала ему голову. Пришлось затратить немало усилий, чтобы остановить пиршество — росомашки ни за что не хотели расстаться с первой в их жизни добычей. Но надо отдать им должное: ни одна не огрызнулась, когда я отнимал у них охотничий трофей. Все обошлось ворчанием и урчанием. Я впервые почувствовал, что росомашки почитают меня как родителя.

А что же кот с собакой? Они, похоже, были расстроены случившимся, а может, толком даже и не поняли, что произошло. Вот насколько потеряна острота охотничьих инстинктов у домашних животных! К слову сказать, и кот, и лайка оказались впоследствии хорошими охотниками.

Еще две недели после упомянутого случая я подкармливал росомашек из соски. Теперь каждая из моих шалуний выцеживала из бутылочки до 150 г смеси. В начале мая я перевел их на другую пищу, бутылочка с соской ушли в прошлое. С появлением первых зубов у щенков росомамама, видимо, начинает подкармливать их тем, что добудет на охоте. Так, вероятно, следует делать и людям, которые пытаются выращивать щенков.

Сколько же открывается нюансов в поведении молодых животных, когда наблюдаешь за ними день за днем! Возвращаюсь я как-то домой, где хозяйничала некоторое время только четверка друзей, ключом открываю дверь и вхожу в коридор. У порога меня ждет Лайма (ее приветливое поскуливание было слышно еще за дверью), откуда-то сверху начинает спускаться кот, а росомашки застыли как мумии, не мигая уставились на меня с почтительного расстояния. Но стоило мне только произнести — «Девочки мои!» — и я узнан, меня радостно встречают. Если я не один, — никакой встречи не будет. Напрашивается вывод, что росомашки узнают по голосу, а не по запаху. Впоследствии я не раз в этом убеждался.

До 12 мая жизнь моих питомцев проходила в довольно стесненных условиях. Поскольку приучить росома-



шек к какому-нибудь одному месту не удалось, их жизненное пространство пришлось ограничить коридором и кухней в двухкомнатной квартире. Лайма к этому времени свои нужды отправляла на улице, а кот облюбовал себе угол в туалете. Росомашки же доводили меня своей нечистоплотностью почти до умопомрачения. Жена грозилась уходом, так же как и взрослые дочери, хотя никто кроме меня не прикасался к уборке за зверьками. Ежедневно мне приходилось убирать примерно по 14 кучек и столько же луж. Скоро нашу квартиру на пятом этаже можно было определить по запаху с первого. Но наступила весна, и можно было перебираться на дачу.

В деревне Челохово, в 7 км от старинного города Боровска, я начал строительство стационара для передержки животных. 12 мая впервые привез туда росомашек и вывел их на прогулку. Сначала взял в лес Маху. Первые 20—30 м она следовала за мной точно по моим следам, жадно к ним принюхиваясь. Мне показалось, что она серьезно изучает их запах, ведь самих отпечатков на лесной дорожке не оставалось. Познакомившись со следами как следует, Маха сначала робко, потом все смелее и смелее стала удаляться от меня. Когда она скрывалась из виду в кустарнике или траве, я звал ее — Маха! Маха! — и похлопывал в ладоши. Она сразу же давала себя обнаружить и, не добежав



*За трапезой.*



до меня нескольких шагов, опять пускалась в исследование окрестностей. Так в первую же экскурсию между нами установился звуковой контакт, а значит, и возможность управлять зверем, находящимся на свободе в лесу.

Мы прошли 350 м лесной дорожкой и оказались на широкой просеке под ЛЭП, поиграли очень весело и шумно и двинулись обратно той же дорогой. На выходе из леса я подманил Маху к себе, как бы играя, взял ее на руки и, продолжая отвлекать игрой, дошел с ней до дому, где нас с нетерпением поджидала Росса. В комнате росомашки поиграли со всей своей живостью, и, покормив их, я отправился в лес, теперь уже с Россой. Эта прогулка мало чем отличалась от предыдущей. Только мне было спокойнее — я уже меньше волновался от постоянной мысли, что могу потерять зверька в лесу. Да и Росса не была такой отчаянной, как Маха, не улепетывала без оглядки, а старалась сама не терять меня из виду. Из леса она вернулась пешком, следуя за мной по пятам. Так окончилась наша первая экскурсия в лес, на свободу.

Строящийся вольер в деревне еще не был готов к заселению, и мне пришлось некоторое время возить зверюшек туда—обратно. На рабочую неделю — в Москву, на выходные — в деревню. В машине росомашки вели себя каждая по-своему. Росса очень быстро успокаивалась, тихонечко, как кошка, заползала

ко мне на колени и укладывалась калачиком. Весь путь — около полутора часов — она могла проспять, почти не меняя позы. А Маха безостановочно пыталась выставить заднее стекло. Какие только кульбиты она ни совершала на полочке перед ним! Но изредка Маха бросала «стекольные» дела, находила у меня на коленях Россу, ворчливо что-то пыталась ей рассказать и снова пускалась на борьбу со стеклом.

Выспавшись за дорогу, в квартире Россса начинала резвиться, а Маха забиралась в какое-нибудь укромное местечко и заваливалась спать.

16 мая случилось несчастье. С раннего утра вся наша семья разбежалась по присутственным местам, и Россса, Маха, Лайма и кот Рефик остались одни. Выехав из Москвы очень рано, я намеревался еще до обеда попасть в Калужское областное управление охотничьего хозяйства. Однако машина барахлила, и мне пришлось вернуться с полдороги. В 12 часов я уже открывал дверь своей квартиры. В коридоре меня никто из зверюшек не встречал. Это было настолько необычно, что душу мгновенно заполнила щемящая тревога. Я стал звать собаку, но на зов из-под книжного шкафа со слабым попискиванием, как-то неестественно, выползла Росса. Я догадался, что причиной тишины была какая-то крупная провинность Лаймы. Росса попыталась подойти ко мне, но вместо этого,



заваливаясь на правый бок, стала описывать круг. В ужасе схватив ее на руки, я понял что у нее парализована вся правая сторона. С Россой на руках я забежал в комнату и, к великой радости, с первого же раза дозвонился до районной ветлечебницы. Хорошо знакомый мне ветеринар по словесному описанию больной росомашки установил диагноз — кровоизлияние в мозг от ушиба — и назначил лечение. Ветеринарам нередко приходится иметь дело с подобными травмами у животных. Не очень тяжелые формы удается вылечить.

Пока я разговаривал по телефону, Росса лежала у меня на коленях, закрыв глаза и постанывая. Вдруг на пороге комнаты появилась Маха, осторожно пригнувшись, но как только я встал с дивана с Россой на руках, Маха исчезла — вход сюда был запрещен. Больную я устроил на мягкой подстилке в картонной коробке и, чтобы обеспечить ей покой, оставил в закрытой комнате. Теперь надо было разобраться в случившемся и срочно заняться лечением пострадавшей.

Когда я вышел в коридор, из кухни шествовал мне навстречу кот, на зов выскочила из-под шкафа Маха, а собака, сколько я ее ни звал, не

откликнулась. Нашел я ее в конуре с очень виноватой и напуганной физиономией. Сомнений, что виновата в случившемся Лайма, не было. Но наказывать ее было уже поздно да и бессмысленно. То ли во время игры всего этого квартета Лайма ударила Россу о стенку или угол шкафа, то ли сдавила ей голову челюстями — так и осталось тайной.

Началось интенсивное лечение Россы. В ход пошли преднизолон, витамины группы В, прозерин и церебролизин. Счастью не было конца, когда на четвертый день Росса самостоятельно выползла из картонного ящика и «просигналила» в дверь, чтобы ее выпустили из комнаты. Через неделю росомашка окончательно выправилась и была воссоединена со своей прежней компанией.

С середины мая росомашки стали терять резцы. Несмотря на тяжелейшую травму, ни в смене зубов, ни в линьке Росса от Махи не отставала. Теперь суточный рацион каждой состоял из 1.2 кг рыбно-геркулесовой или мясо-геркулесовой похлебки и сырой тушки минтая с костями. За сутки они поглощали еду, которая составляла не меньше 1/5 части их собственной массы, а сами они весили уже примерно по 6 кг.

*Собака в гостях у росомашек.*



*Приятно поразмяться.*

Регулярные прогулки в лес начались с 19 июня — дня перевода росомашек на постоянное место жительства в деревне. Каждый день, регулярно, мы по часу проводили в лесу всей компанией. Пристрастился к прогулкам и кот Рефик. Росомашки уже значительно переросли кота и пытались «задавить» его. Поэтому ему почти постоянно приходилось спасаться на деревьях, куда сестрички еще не могли забраться, — они предпочитали пока залезать на повалившийся или сильно наклоненный и вывернутый с корнем ветровал. Кот провожал нас до просеки, а когда мы начинали там играть, не спеша поворачивал к дому и, дойдя до опушки леса, ждал нас. Так что мы играли вчетвером — я, Лайма и Росса с Махой.

В среду, 26 июня, мы, на этот раз без кота, пошли гулять рано, едва пропикало шесть часов. Ночью прошел несильный дождик. Трава мокрющая. Росомашки с удовольствием выкупа-

лись в траве. На просеке в автомобильной, заросшей травой, колее образовались чистенькие лужи, очень приглянувшиеся зверюшкам. Такую они устроили игру в догонялки, что я не решался подходить близко, боясь оказаться мокрым с ног до головы. Решил их пофотографировать. Когда догонялки по лужам надоели, росомашки как-то дружно увязались за Лаймой по «беличьим делам». А я взялся за дневник: нужно было в спокойной обстановке записать наблюдения. Покончив с этим, перезарядил фотоаппарат и стал вслушиваться. Ни одного близкого шороха. Видимо, росомашки с Лаймой ушли слишком далеко.

Прошло не меньше 10 минут, я заволновался, стал подзывать своих зверюшек. Буквально через минуту во всей своей красе шумно примчалась Лайма, а немного погодя, показалась изрядно запыхавшаяся Маха. Волнения мои улеглись, хотя Россы все не было — ее нерасторопность я объяснял

себе недавно перенесенной болезнью. Однако прошло еще несколько минут, но на мой зов и похлопывания в ладоши Росса так и не отозвалась. Маха с Лаймой начали проявлять излишнюю самостоятельность. Тогда я бегом направился по лесной дорожке к дому, собака с росомашкой бросились за мной. Буквально за пять минут я добежал до дома, оставил Маху в комнате, а с Лаймой вернулся на просеку. Мы обследовали ближайшие окрестности — тщетно, Россы нигде не было. Прошло более получаса, как потерялась моя любимица. Надо было расширить поиски. Я вернулся домой за велосипедом и уже без собаки отправился к ближайшему дачному поселку Каверино, расположенному в лесном массиве.

Начал поиск там, где просека ближе всего подходит к автотрассе, а это уже около километра от места потери зверюшки. Вышел на дорогу, тщательно осмотрел колею с двух сторон, но никаких росомашьих следов не обнаружил. Остановился передохнуть и несколько раз позвал громко — Росса, Росса, Росса! В ответ — тишина, до звона в ушах. Кругом трава по пояс, где уж тут маленькой росомашке продраться! Вконец огорченный, повернул к шоссе и вдруг услышал шорохи: по моим следам пробиралась Росса. Радости нашей не было границ. Я схватил росомашку на руки, и она стала о чем-то ворковать, думаю — о своих переживаниях.

С Россой на руках я попытался поехать на велосипеде, но еле-еле удержал ее — видимо, из страха она начала вырываться. Из верхней одежды на мне были только тренировочные брюки, пришлось снять и посадить в них росомашку. Держа в одной руке велосипед, а в другой — ворчащую от неудобств любимицу, двинулся пешком к дому. День все же завершился благополучно.

Я пришел к выводу, что выгуливать росомашек нужно без собаки,

тогда они далеко от меня не уходят. В тот день я еще раз убедился: зверек возвращается не по следу (в пяту), а ориентируется по слуху. Поведение Россы явно указывало, что ее состояние еще очень далеко от состояния полностью здорового зверя.

Следующие две недели я целиком занимался строительством вольера. Росомашки были заперты в доме и буквально сходили с ума, стараясь вырваться на свободу. Они умудрились проникнуть на второй этаж, оттуда высочить через окно на крышу террасы, а потом и на землю. Подлетев к строящемуся на опушке леса вольеру, они будто докладывали о своих проказах и стремглав удалялись в лес. Мне ничего не оставалось, как делать вынужденный перерыв и идти за ними. В лесу зверюшки брали меня в свою компанию, и мы наслаждались свободой около часа. Только набегавшись вволю, они соглашались вернуться в дом.

Наконец все строительные работы были закончены, и 29 июля, часов в шесть утра, я перенес росомашек в просторный вольер, туда же отправил и Лайму. Еще в доме зверюшки были накормлены так, что не доели свою вкусную похлебку.

На новом месте все трое принялись играть, я тем временем внимательно рассматривал их и делал записи в полевом дневнике. Щенячий волос у росомашек уже почти полностью выпал, хвост опушился. Шляя, заходившая у месячных щенков почти до кончиков хвостовых волос, сузилась и поднялась — теперь она охватывала только корень хвоста. Клыки, начавшие меняться еще в конце июня, стали довольно большими, особенно верхние. Нижние же, как и резцы, заметно отставали в росте. Окончив записи, я отправился с росомашками в лес, с тем чтобы после прогулки они самостоятельно вернулись со мной в вольер.

*(Продолжение в следующем номере)*

## По следам исчезнувших тахи

Н. В. Паклина



*Наталья Владимировна Паклина, младший научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН. Область научных интересов — поведение и экология лошадей, охрана природы и реинтродукция животных.*

**ТАХИ** — монгольское название лошади Пржевальского (*Equus przewalskii*). Во время своей третьей центральноазиатской экспедиции (1879—1880) Н.М.Пржевальский первым из европейских ученых увидел диких лошадей в природе. Вот как он описал эту историческую встречу, которая произошла во время перехода экспедиции от реки Булган к восточным склонам хребта Байтаг-Богдо: «Мне лично удалось встретить только два стада диких лошадей. К одному из этих стад можно было подкрасться на меткий выстрел, но звери почуяли по ветру, по крайней мере за версту, моего товарища и пустились на уход. Жеребец бежал впереди, оттопырив хвост и выгнув шею, вообще с посадкою совершенно лошадиною; за ним следовали семь, вероятно, самок. По временам звери останавливались, толпились, смотрели в мою сторону и иногда лягались друг с другом; затем опять бежали рысью и, наконец, скрылись в пустыне»<sup>1</sup>.

В то время ареал дикой азиатской лошади ограничивался пространством, которое Н.М.Пржевальский называл пустыней Чжунгарской, расстилавшейся «между Алтаем на севере и Тянь-Шанем на юге. На западе она также резко ограничивается Сауром и теми горными хребтами <...>, которые тянутся от Тарбагатай к Тянь-Шаню. На востоке описываемая пустыня, много суженная тем же Алтаем и тем же Тянь-Шанем, непосредственно соединяется со степями и пустынями Центральной Азии, известными под общим названием Гоби».

Но год за годом ареал лошади Пржевальского сокращался. В 30—40-х годах нашего века тахи можно было

© Н.В.Паклина

<sup>1</sup> Пржевальский Н.М. Из Зайсана через Хами в Тибет и на верховья Желтой реки. СПб., 1883.



*Остепненные пустыни в предгорьях хребта Тахийн-Шара-Нуру.*



*Родник Хайрхан-Булак и окружающий его оазис.*

*Лошади Пржевальского.  
Фото автора*



встретить уже только в районе к северу и югу от хребтов Байтаг-Богдо и Тахийн-Шара-Нуру, в квадрате, лежащем примерно между 89°—94° в.д. и 44°30'—45°30' с.ш.<sup>2</sup> На территории монгольской части Джунгарии тахи стали редкими уже в 50-е годы, а последние сведения о встречах с тахи приходятся на конец 60-х годов. На территории Китая дикие лошади просуществовали не намного дольше: последний раз группу тахи видели в предгорьях Байтаг-Шань в 1978 г. Все более поздние попытки найти тахи в природе оставались безрезультатными. Стало очевидным, что тахи сохранились только в зоопарках, куда несколько представителей этого вида было завезено в начале XX в. К тому времени уже безвозвратно исчезли ближайшие родственники тахи — южнорусский и лесной тарпаны, и лошадь Пржевальского осталась единственным диким представителем подрода настоящих лошадей. Чтобы не потерять этот уникальный вид, необходимо было без промедления начинать работы по восстановлению лошади Пржевальского в природе.

В 1988 г. в составе Совместной советско-монгольской биологической экспедиции АН СССР и АН МНР, возглавляемой с нашей стороны академиком В.Е.Соколовым, был организован специальный отряд, которому предстояло разработать научную программу реинтродукции лошади Пржевальского в природу Монголии и подобрать подходящий участок для начала работ. Кроме автора этой статьи в состав отряда входили также сотрудник нашего института М.К.Позднякова и сотрудник Института биологии АН МНР Г.Амарсанаа. Перед тем как приступить к поиску участка, нам необходимо было решить, в какой природной зоне (степной или пустынной) следует проводить поиск. С одной стороны, палеонтологические данные указывают на то, что в

историческом прошлом ареал лошади Пржевальского охватывал обширные степные территории, а с другой — известно, что в конце прошлого века дикие азиатские лошади жили в Джунгарской пустыне<sup>3</sup>. Единогласного мнения о местах обитания тахи среди ученых-путешественников конца XIX в. не было (его нет и сегодня). М.В.Певцов, например, писал, что дикая лошадь чаще всего встречалась в опесчаненной пустыне с редким, но высоким саксаулом, где имеются плоские впадины, поросшие «редким приземистым камышом и немногими солянками», а также в щебнистой пустыне, покрытой местами «тощим кипцом», и, кроме того, посещала по временам северную окраину Гученского леса, «весьма богатую растительностью»<sup>4</sup>. Г.Е.Грум-Гржимайло, описавший охоту на диких лошадях у солонцеватого оз.Ачик-Су, отмечал, что местность, окружающая озеро, «была довольно ровная и к югу, до самых песков покрыта кормовой травой»<sup>5</sup>. Но этих данных было, конечно, недостаточно.

К счастью, когда мы подошли к решению этого вопроса, уже существовала очень подробная карта растительности монгольской части Джунгарии<sup>6</sup>, т.е. тех самых мест, где Н.М.Пржевальский видел диких лошадей. В легенде к карте написано: «Джунгарская Гоби представляет собой обширную впадину, окруженную с трех сторон горными хребтами. От подножий хребтов до центральной части впадины происходит падение высоты на 800—1000 м, что определяет четкую зональную смену почв и растительности. На территории Джунгарской Гоби можно встретить различные зонально-поясные типы растительности: от край-

<sup>3</sup> Пржевальский Н.М. Цит. соч.; Гептнер В.Г., Насимович А.А., Банников А.Г. Млекопитающие Советского Союза. М., 1961. С.715—729.

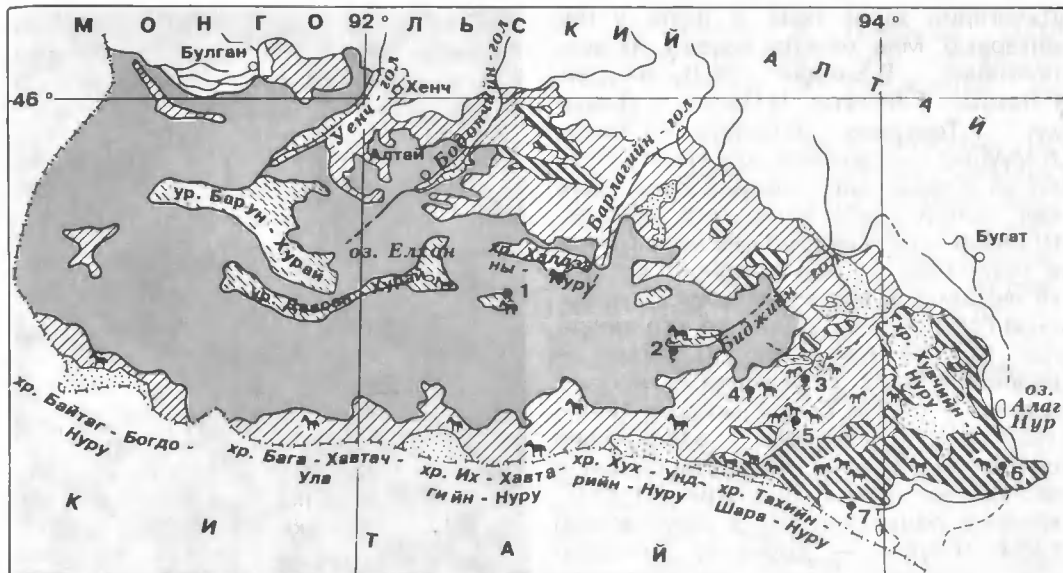
<sup>4</sup> Певцов М.В. Путевые очерки Джунгарии. СПб., 1879. Кн.1.








<sup>5</sup> Грум-Гржимайло Г.Е. Описание путешествия в Западный Китай. СПб., 1896. Т.1.

<sup>6</sup> Волкова Е.А., Рачковская Е.И. Карта растительности Джунгарской Гоби // Геоботан. картогр. Л., 1980. С.24—39.

<sup>2</sup> Банников А.Г. Современное состояние и биология дикой лошади // Природа. 1959. № 5. С.50—55.





-  Места обитания лошади Пржевальского
-  Крайнеаридные пустыни на крайнеаридных почвах и полустарничковые и кустарничковые (настоящие) пустыни на серобурых почвах
-  Растительность солончаков, такыров, пойм рек
-  Предгорные злаково-полустарничковые пустыни на палеобурых почвах
-  Предгорные пустынные злаковники на бурых почвах
-  Горные опустыненные степи на светло-каштановых почвах, горные сухие и умеренно сухие степи на горных каштановых и темно-каштановых почвах
-  Родники: 1 - Тэхийн-Ус, 2 - Хонь-Ус, 3 - Гун-Тамга, 4 - Тонгийн-Ус, 5 - Хайрхан-Булак, 6 - Уртын-Булак, 7 - Элгэн-Ус

*Места обитания лошадей Пржевальского на территории монгольской части Джунгарской Гоби в 30–60-х годах (по: Волюва Е.А., Рачковская Е.И., 1980).*

глазах людей, которым сейчас должно быть от 50 до 90 лет и которые могли бы рассказать нам о многом.

Так было решено отправиться в Джунгарскую Гоби для того, чтобы использовать, может быть, последнюю возможность услышать и записать рассказы очевидцев о жизни тахи в последние десятилетия их существования в природе и выяснить причины, приведшие к вымиранию вида.

В первую экспедицию с нами отправился известный монгольский зоолог Н.Хотолхуу. Он прекрасно знал территорию Джунгарской Гоби, так как еще в 60-х годах принимал участие в экспедициях по поиску тахи, у него были знакомые среди стариков-охотников. Во второй поездке нас сопровождал друг и коллега Н.Хотолхуу — Н.Довчин. Хотолхуу и Довчин в 1969 г. одними из последних видели тахи в природе, у родника Тодгийн-Ус. Всего мы совершили три экспедиции в Джунгарскую Гоби.

Нам удалось найти 13 человек, которые помнили времена, когда в

неаридных пустынь до сухих степей и высокогорных кобрезиевиков. По мере повышения высоты над уровнем моря повышается и урожайность пастбищ».

Оставалось выяснить где именно на этой большой территории с разнообразной растительностью жили тахи? Они встречались здесь вплоть до начала 70-х годов, а это значит, что исчезновение вида происходило на

Джунгарии жили тахи, и взять у них интервью. Мне хочется назвать их всех поименно: Б.Балдан, Ж.Дугарсурен, Г.Намдаг, Г.Монгол, Ц.Пагма, С.Даваахуу, Г.Товуужав, Б.Баасуу, Т.Хаван, Л.Муушар — жители поселков Уенч, Алтай (Ховдосского аймака), Бугат, Тонхил, Алтай (Гоби-Алтайского аймака); Ш.Базар — офицер пограничного отряда в 1942—1948 гг., под контролем которого находилась вся территория Джунгарской Гоби от пос.Булгана до юго-западных отрогов Адж-Богдо; Д.Чойжил — рядовой солдат, служивший на погранзаставе у хребта Байтаг-Богдо в 1946—1950 гг.; С.Дуламцерен — заведующий сектором экологии Института общей и экспериментальной биологии АН МНР, который родился и рос в Джунгарской Гоби; Ч.Чулун — директор Большого гобийского заповедника, также проводивший молодые годы в окрестностях Ташийн-Шара-Нуру.

Интересно, что только одна из нескольких опрошенных женщин смогла немного рассказать нам о тахи. Занятые домашними делами и не принимавшие участия в охоте, они часто даже не знали, кто такие тахи. Другое дело было с мужчинами-охотниками. В юртах, где мы беседовали со стариками, обычно собиралось много людей. Всем им, как и нам, хотелось из первых уст услышать рассказы о жизни тахи.

В первую очередь мы старались выяснить, насколько хорошо наши собеседники представляют себе животных, о которых мы хотим их расспросить, и не путают ли они их с куланами. Но ответы старых охотников рассеяли все наши сомнения. С большого расстояния, соглашались они, отличить тахи от кулана было трудно, а вблизи это сделать легко. Хвост у тахи гуще и длиннее, чем у кулана, но тоньше и короче, чем у домашней лошади; грива стоячая и высокая; у тахи след круглый и большой, а у кулана — меньше и овальный. Во время преследования тахи периодически останавливались и смотрели на людей, описав перед этим дугу, чтобы поднятая ими пыль



*Б.Балдан — монгольский охотник, который дал нам одно из наиболее подробных и интересных интервью о тахи.*

*Фото Тонни де Катес*

не мешала смотреть. Охотники также называли тахи «пятнистыми», подразумевая под этим их более контрастную, чем у кулана, окраску: темные гриву, хвост и ноги, белые конец морды и живот на фоне общей желтоватой окраски.

Мы заготовили список интересовавших нас вопросов, но были только рады, когда беседы выходили за рамки анкетного опроса и старые араты вспоминали случаи из жизни. Память собеседников сохранила не только даты и названия мест встречи с тахи, но и многие интересные подробности давно прошедших событий.

Эти беседы, конечно же, были бы невозможны без помощи наших монгольских коллег, которые переводили вопросы и ответы с одного языка на другой. Понимая уникальность получаемой информации, мы записывали все беседы на магнито-

фон. И позднее, при расшифровке записей, просили сотрудника Института биологии АН Монголии С.Лхагвасурена, согласившегося взяться за это непростое дело, переводить ответы арапов дословно.

**Места обитания.** Рассказы очевидцев помогли нам установить, что лошади Пржевальского в 30—40-х годах расселялись весьма неравномерно по территории Джунгарской Гоби. Особенно много тахи было в юго-восточной части котловины. Хребет Хувчийн-Нуру служил восточной границей распространения тахи. Там они обитали только в западных и южных предгорьях. На юго-востоке граница ареала охватывала восточные склоны Тахийн-Шара-Нуру и южные склоны Хувчийн-Нуру. Крайней восточной точкой ареала был родник Уртын-Булак, до хребта Адж-Богдо тахи не доходили. Некоторые монголы говорили, что в зимнее время по восточным склонам Хувчийн-Нуру лошади спускались к оз.Алаг-Нур. Часто охотники встречали группы тахи в северных предгорьях хребтов Хух-Ундрийн-Нуру, Их-Хавтагийн-Нуру и Бага-Хавтаг-Ула. Реже они встречались около стоящего несколько обособленно хребта Байтаг-Богдо-Нуру. По межгорным долинам лошади переходили на южные склоны перечисленных хребтов, на территорию Китая. Западнее соленого оз.Елхон тахи почти не встречались, за исключением редких заходов в урочище Давсан-Хурай. Но и на обширной территории между родником Гун-Тамга и оз.Елхон они паслись не повсеместно, а главным образом около родников Хонь-Ус и Тахийн-Ус. Крайними северными точками, куда в эти годы заходили лошади Пржевальского, были хребет Халдзан-Нуру и гора Хух-Дэл.

Собранные данные о распространении лошадей Пржевальского в 30—40-е годы нашего века мы наложили на карту растительности Джунгарской Гоби<sup>7</sup> и увидели, что тахи совсем не использовали центральную ее часть, занятую крайнеаридными и настоящи-

ми пустынями. В пределах зоны настоящих пустынь тахи посещали только родники и окружавшие их оазисы.

Тахи предпочитали держаться на высоких подгорных равнинах, занятых пустынными степями и мелководновинно-ковыльковыми пустынями, где основу их рациона составляли злаки (ковыль галечный, ковыль восточный, житняк гребенчатый, пырей Невского и др.) — излюбленный корм всех лошадей. Эти гиперксерофитные злаки отличаются высокой питательной ценностью<sup>8</sup>.

Хребет Тахийн-Шара-Нуру, который монголы называют родиной тахи, почти полностью занят остепненными пустынями. Название этого хребта у нас обычно переводится «Хребет желтой лошади», тогда как на самом деле его следует переводить «Желтый хребет тахи». Хребет получил это название потому, что большую часть года он весь желтый от высохших на солнце ковылей и житняка.

Большое скопление тахи именно в юго-восточной части Джунгарской Гоби объясняется несколькими причинами. Во-первых, горы, окружающие эту часть природной котловины, служат барьером, перехватывающим значительную долю осадков атлантического переноса. Это наиболее благоприятный по климатическим и кормовым ресурсам регион Джунгарской Гоби. Пастбища этого региона отличаются большой продуктивностью (до 3 ц/га) и стабильностью урожайности. Кроме того, в западных предгорьях хребта Хувчийн-Нуру и в ложбинах на равнинах, прилегающих к горам, распространены степные сообщества с доминированием типчака (*Festuca sp.*), который Певцов называл «тощим кипцом». На самом деле растение — прекрасный весенне-раннелетний корм для лошадей. Во-вторых, до 1952 г., пока пограничная застава находилась рядом с родником Хайрхан-Булак и местным жителям запрещалось заходить на территорию, расположенную южнее

<sup>7</sup> См. сноску 6.

<sup>8</sup> Юнатов А.А. // Учен. зап. Монг. ун-та. 1947. Т.2. Вып.6. С.1—28.

этого родника, тахи здесь никто не беспокоил. И, в-третьих, эта часть Джунгарской Гоби особенно богата родниками и окружающими их оазисами. Оазисы в пустыне — своеобразные резервы кормов (урожайность достигает 7 ц/га). Растительность там представлена тростниковыми зарослями, чиевниками, чиевыми чингильниками, участками раемюриевых саксаульников и волоснецовых лугов.

По мнению местных жителей, растительность Джунгарской Гоби несколько изменилась с тех пор, как здесь жили тахи: исчезли вырубленные на дрова саксауловые леса, где любили отдыхать тахи, от ежегодного скашивания ниже стали тростниковые заросли, которые раньше скрывали всадника.

Вблизи поселков пастбища также стали скуднее. «Там где раньше лису не заметишь, теперь мышь видно», — отмечали охотники. В остальном же растительность сохранилась такой же, какой была в начале века.

Выслушав рассказы местных старожилов, мы окончательно убедились в том, что есть больше оснований считать лошадь Пржевальского обитателем степей и полупустынь, чем настоящих пустынь<sup>9</sup>. К моменту открытия дикой азиатской лошади Пржевальским вид уже был вытеснен из степей на край ареала. Существовать в Джунгарской Гоби лошадям позволяли богатые кормом участки пустынных степей в Центральной Азии, аналогов которым нет в пустынных районах ни Средней Азии, ни Казахстана. Поэтому начинать работу по восстановлению вида следует в оптимальных для него степных биотопах.

**Охота на тахи.** У Н.М.Пржевальского во время экспедиции не было возможности поохотиться за тахи. Экземпляр дикой лошади, доставленный им в музей Академии наук, был добыт охотниками-киргизами и подарен ему начальником Зайсанского

поста А.К.Тихоновым. Охота за дикими лошадьми представлялась Пржевальскому чрезвычайно затруднительной. «На такую охоту, — писал он, — можно пускаться лишь зимою, когда в безводной пустыне выпадает снег. Тогда, по крайней мере, нельзя погибнуть от жажды. Зато в это время охотников будут донимать день в день сильнейшие морозы. Чтобы укрыться от них хотя бы ночью, необходимо взять с собою войлочную юрту; затем следует запастись продовольствием и вообще снарядить небольшой караван, т.к. на подобной охоте придется выехать многие сотни верст и потратить месяц времени.»

Три шкуры, доставленные в Петербург экспедициями В.И.Роборовского и П.К.Козлова также были добыты местными охотниками. Пожалуй, первыми европейцами, охотившимися на диких азиатских лошадей были братья Грум-Гржимайло, оставившие подробные описания охоты (1896).

В 30-х годах местные жители также считали охоту на тахи непростой задачей, хотя и не такой сложной, как она представлялась Пржевальскому. При охоте на тахи монгольские охотники учитывали привычки и особенности поведения тахи. Например, они устраивали засады в предгорьях, потому что знали, что тахи на ночь уходят в горы, а днем выходят пастись на равнину. Часто охотники поджидали их у родников, куда тахи приходили на водопой, или подкрадывались к ним, прячась среди своего пасущегося скота.

Тахи — осторожные животные, они обладали удивительным слухом и обонянием. Поэтому охотились на них не больше, чем на куланов, джейранов, сайгаков или архаров, которых много водилось в начале века в Джунгарской Гоби. Охотники всегда следовали древнему правилу: «никакой царь, никакой князь и ни один человек не смеет охотиться на зайцев, оленей, ланей и антилоп, на всех зверей, что плодятся, с марта по октябрь. Кто противное учинит, жестоко раскается». Буддистская религия запрещала также

<sup>9</sup> Соколов В.Е., Амарсанаа Г., Паклина Н.В. и др. // Зоол. журн. 1991. Т.70. Вып.5. С.111—116.

убивать больше животных, чем было необходимо для пропитания.

От Б.Балдана из бригады Барлаг мы услышали такую историю: «Однажды вечером брат моего отца Лут поехал верхом, чтобы подогнать свой скот на ночь поближе к юрте, и вдруг увидел табунок тахи с черной домашней лошадью. Он решил поймать эту лошадь и погнался за группой тахи вверх по пологому склону, не подозревая, что он оканчивается обрывом. Испуганные тахи поскакали от него прочь и с разбега, не успев отвернуть, сорвались с обрыва. Только черная лошадь ушла в сторону. Лут остановил свою лошадь у самого края и увидел на дне ущелья семь умирающих тахи. Он очень испугался: во-первых, он сам мог разбиться, а во-вторых, по его вине погибло много тахи, а он не хотел их убивать, он хотел только поймать черную лошадь. Он был верующим человеком и поэтому в тот же вечер пошел в монастырь к ламе раскаиваться в совершенном грехе».

У богатых людей было достаточно собственного скота, чтобы прокормить семью, а беднякам приходилось охотиться на диких животных. В пограничном хушу (современный пос.Булган) люди жили особенно бедно. Банды казахов, скрывающиеся в горах от китайского правительства, совершали набеги на поселения монголов, грабили их и угоняли скот. Поэтому каждому охотнику полагалось кормить несколько семей. В пос.Уенч мы встретились с известным монгольским охотником Л.Мушаром, дед которого как раз жил в этом хушу и тоже был хорошим охотником, кормившим 10 семей. Перед смертью он говорил: «Я очень много убил зверей. Только тахи и куланов 500, а остальных и не помню сколько. Так что в будущей жизни мне, наверно, будет очень плохо».

Б.Балдан неоднократно охотился на лошадей Пржевальского и рассказывал нам, что «мясо тахи го вкусу почти не отличается от мяса домашней лошади — очень жирное и вкусное. Жир желтого цвета, а не

белый, как у кулана». Использовали не только мясо убитых животных, но и шкуры, и даже хвосты. Из кожи, снятой с шеи и спины, шили кожаные тапочки для войлочных сапог, которые называются «тоху» или «бараг». Охотники рассказывали: «Шкура была толщиной в палец, и обувь из нее можно было носить целый год. В такой обуви было удобно ходить по горам. Из шкуры кулана тоже можно делать тоху, но по крепости куланья шкура не сравнится со шкурой тахи. Утром уйдешь за скотом в куланьих тоху, а вечером уже вернешься с босыми ногами». Торгуты в Булгане до сих пор изготавливают такую обувь, но вместо шкур тахи используют верблюжьи шкуры или шкуры крупного рогатого скота. Из грубого хвостового волоса делали шур — веники, чтобы подметать пол в юрте и веера, чтобы отгонять мух и комаров.

Но до 40-х годов охотники не причиняли большого ущерба диким животным, так как пользовались старыми монгольскими ружьями «цахиур бу», «монгол бу» и «бялтат бу». Чтобы из них убить животное, надо подкрасться к нему очень близко, метров на 40, и стрелять со специального упора. Ружья были пороховыми, и для их перезарядки требовалось много времени, поэтому убить больше чем одно животное за один раз было невозможно.

**Гибридизация с домашними лошадьми.** В те времена, когда тахи еще было много в Джунгарской Гоби, они, особенно в зимнее время, собирались в большие табуны численностью до 50—100 голов, которые издали напоминали табуны домашних лошадей. Весной, перед началом гона, табуны распадались на небольшие группы — косяки (20—30 особей), в каждой из которых был только один взрослый жеребец. Как и косячные жеребцы в домашних табунах, они изгоняли из своих групп молодых самцов, достигших зрелости.

По мере сокращения численности тахи в Джунгарской Гоби сокращались и размеры групп. Люди, встречавшие

тахи после 1944—1945 гг., сообщали о группах численностью, как правило, не более 10 голов. Часто это были совсем маленькие группы по два-три тахи или одиночные животные.

Лошади Пржевальского избегали людей, но жеребцов привлекали домашние кобылы. И часто молодые самцы тахи, изгнанные вожаками из родных групп, приходили к домашним табунам. Поэтому гибриды в домашних табунах встречались довольно часто. Труднее молодым тахи было увести какую-нибудь кобылку с собой, но случалось и такое. По домашним лошадям местные люди и отличали группы тахи, так и называя их: косяк тахи с белой лошадей (цаган мортъ тахь сурэг) или косяк тахи с черной лошадей (хар мортъ тахь сурэг).

Дикие азиатские лошади, видимо, были выносливее, но не резвее домашних лошадей, на которых можно догнать тахи. Однако бывали случаи, когда раненные лошади Пржевальского нападали на всадников, пытавшихся приблизиться к ним, поэтому охотники опасались преследовать тахи. «Тахи — они бойкие и злые», — говорил нам охотник Л.Мушар.

Гибриды бегали быстро, но тоже не быстрее домашних лошадей. А так как их трудно было приручить (даже от юрт они обычно держались подальше), местные жители не стремились к получению гибридов. Люди опасались, что тахи уведут их лошадей с собой. Уходившие с тахи домашние лошади быстро дичали, и вернуть их назад бывало очень трудно. Поэтому, заметив тахи, люди старались отогнать свои табуны от «дикарей», неосознанно помогая тахи «сохранять свой вид в чистоте».

**Причины исчезновения тахи.** Прежде чем приступать к разработке программы реинтродукции лошади Пржевальского в Монголии, нам было необходимо установить причины исчезновения этого вида из природы, чтобы не обречь привезенных лошадей на гибель, а программу — на неудачу.

По мнению большинства очевидцев, резкое сокращение числа тахи

началось зимой 1944/45 г. Эта зима, последовавшая за летней засухой, вошла в историю Монголии под названием «Джут<sup>10</sup> года обезьяны». Такие суровые зимы бывают в Монголии не чаще, чем один раз в 100 лет. Обычно зима в Джунгарской Гоби малоснежная и морозы не опускаются ниже  $-25^{\circ}\text{C}$ . Устойчивый снежный покров устанавливается только в горах, а на равнине выпадает не каждый год и лежит не везде. Поэтому скот круглый год питается подножным кормом и у аратов никогда не было забот ни о заготовке сена, ни о постройке специальных помещений.

Но та зима была необычной. Мороз опускался ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Почти каждый день свирепствовали снежные бураны. В Гоби выпал глубокий снег, который держался несколько месяцев. Травы из-под снега не было видно. Началась массовая гибель оставшегося без корма скота. В те времена одна семья содержала от 300 до 1000 голов домашних животных, и многие потеряли весь свой скот. Из трупов араты строили укрытия для уцелевших животных.

«Так неужели и тахи не выдержали суровой зимы и погибли?» — спрашивали мы аратов. И получали ответ: «Нет, и до этого бывали суровые зимы, но тахи не гибли, они очень выносливые. Я не видел в тот год ни одной погибшей тахи и ни от кого не слышал об этом. В ту зиму погибло много скота, и поэтому местные люди были вынуждены охотиться. Они много убивали тахи, и они куда-то ушли».

Итак, основная причина исчезновения лошади Пржевальского из природы Монголии — это охота, и охота не со старыми монгольскими ружьями, а на машинах с новым нарезным оружием.

С 30-х годов в горах на границе с Монголией жило около тысячи семей казахов — мусульман, скрывавшихся от китайского правительства. Они совершали набеги на близлежащие монголь-

<sup>10</sup> Зимняя бескормица скота (монг.).

ские районы, грабили и убивали местных жителей. С 1940 г. эти банды, которых опасались и китайское и монгольское правительство, возглавлял некий Осван.

Китайское правительство под предлогом уничтожения банд сосредоточило войска у монгольской границы. Так, на южных рубежах Монголии появилось два потенциальных врага.

Чтобы нейтрализовать одного из них, монгольское правительство договорилось с Осваном вместе воевать против гоминдановцев. За это, кроме материальной помощи, Осван потребовал вооружить его людей и разрешить ему жить на территории Монголии, в Джунгарской Гоби. Условия Освана были приняты<sup>11</sup>. Казахи с семьями переселились в Джунгарскую Гоби. Своего скота у них почти не было, а оружия и пуль достаточно. Они стали добывать мясо охотой. Предпочитали лошадиное мясо, и поэтому убивали много тахи и куланов.

Монгольское правительство также ввело свои войска в Джунгарскую Гоби. В пограничных районах создавались отряды самообороны, которым выдавалось оружие. Таким образом, в середине 40-х годов на территории Джунгарской Гоби оказалось сосредоточено большое количество вооруженных людей.

После того как пограничный пункт был перенесен с родника Хайрхан-Булак на юго-восточные скло-

ны Тахийн-Шар-Нуру, люди продвинулись на юг, заняв всю территорию до родника Элгин-Ус. Переселенцы стали использовать северные и даже южные склоны Тахийн-Шар-Нуру. А отступить тахи было уже некуда: дальше их ждали только лишённые растительности гаммады Заалтайской и Номын Гоби.

Итак, три причины, действовавшие в комплексе, привели к исчезновению тахи из природы за очень короткий срок:

— суровая зима, погубившая много скота и вынудившая людей охотиться;

— появление в Джунгарской Гоби огромного количества современного нарезного оружия и машин, облегчивших охоту;

— продвижение аратов со скотом на юг и вытеснение тахи с водопоев и пастбищ.

Никто из наших собеседников не верил, что тахи исчезли навсегда: «На них много охотились, и они куда-то ушли. Наверно, они живут в Китае. Но они обязательно вернуться, потому что здесь их родина». Мы не возражали и не говорили им, что в Китае тахи тоже нет, потому что не хотели отбирать у старожилос последнюю надежду, а еще и потому, что сами верили в то, что тахи вернуться в Монголию. Хотя знали, что путь им предстоит не близкий и лежать он будет не из Китая, а из Европы. Люди, которые некогда так жестоко обошлись с тахи, теперь обязаны помочь им вернуться, чтобы искупить свою вину за содеянное.

<sup>11</sup> Дорж Б. Эх орны теев цохилох зурх (монг.) // Улаанбаатар, 1981.

# Юдиново — поселение охотников на мамонта

**З. А. Абрамова,**

доктор исторических наук

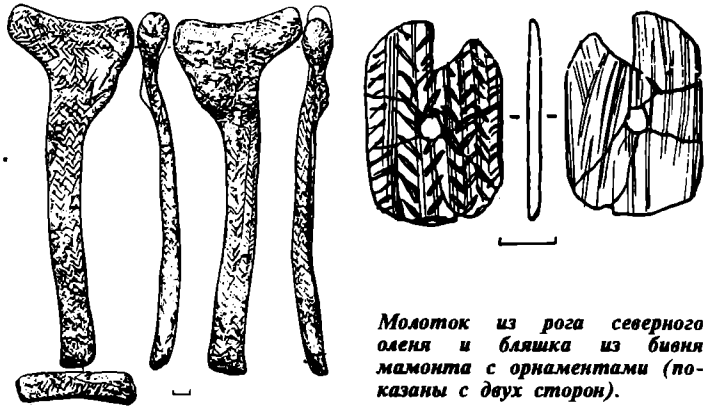
**Г. В. Григорьева,**

кандидат исторических наук

Институт истории материальной культуры  
Санкт-Петербург

**Ю**ДИНОВО — один из самых примечательных памятников позднего палеолита на Русской равнине<sup>1</sup>. На этом поселении представлена выразительная картина жизни охотников на мамонта, обитавших в приледниковой зоне Восточной Европы, где сохранялись условия, пригодные для существования стад мамонта, и где люди проявляли незаурядную способность адаптироваться к суровому климату. Напомним, что оно находится в с.Юдиново Погарского района Брянской области, примерно в 400 км к юго-западу от Москвы. Культурный слой залегает в лессовидных отложениях низкой террасы правого берега р.Судости на глубине 2.1—2.3 м от современной поверхности. Серия радиоуглеродных дат имеет широкий диапазон — от 18 до 12 тыс. лет назад, но в согласии с другими данными можно полагать, что поселение существовало в пределах 15—14 тысячелетия до наших дней. Ныне работы ведутся в двух пунктах.

В музейном павильоне



*Молоток из рога северного оленя и бляшка из бивня мамонта с орнаментами (показаны с двух сторон).*

сохраняются остатки двух жилых структур из костей мамонта и главное внимание уделяется их консервации на основе методики, разработанной Е.П.Мельниковой (Эрмитаж). В одном из жилищ расчищены и оставлены на месте кости по меньшей мере 32 мамонтов (если считать по черепам). Для постройки кольцевого ограждения-фундамента и для перекрытия использовались также бивни (21), нижние челюсти (19), лопатки (35, из них у 19 — намеренно пробитые отверстия), тазовые кости (11), трубчатые кости ног (31). Конструкция другого жилища, вскрытого не целиком, так как часть его уходит под стену павильона, имеет свои особенности. Здесь меньше черепов, нижних челюстей и бивней, лопаток и тазовых костей, но значительно больше трубчатых (90). Особый интерес представляет стенка

жилища, где вместе с другими костями размещены 5 отдельных участков позвоночника, в каждом из которых в анатомической связи находится по 8, 6, 4, 7 и 7 позвонков. Любопытная черта жилища — узкий вход-лаз длиной до 2 м, стенки которого укреплены черепами и лопатками мамонта.

За пределами музейного павильона, в раскопе II, впервые заложенного в 1988 г., обнаружены кости мамонта, и прежде всего целые черепа. Возможно, это остатки какой-то конструкции, но не исключено, что просто не использованный при строительстве жилищ запас костей. К сожалению, новое скопление костей не может быть прослежено из-за опасности обвала.

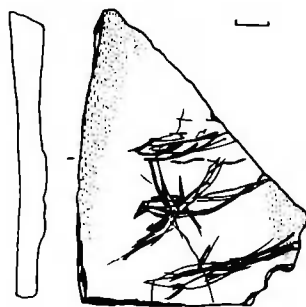
В раскопе II обнаружены мощные зольные пятна, насыщенные культурными остатками: обломками кост-

© З.А.Абрамова, Г.В.Григорьева  
<sup>1</sup> Абрамова З.А. Жилище из костей мамонта на берегу Судости // Природа. 1984. № 5. С.52—53; Абрамова З.А., Григорьева Г.В. Слоновая кость в умелых руках наших далеких предков // Природа. 1992. № 4. С.70—71.



тей животных (преимущественно мамонта и песца), костным углем и множеством кремневых орудий и отходов производства (на отдельных участках — от 3 до 5 тыс. кремней на 1 м<sup>2</sup>). Набор кремневых орудий, очевидно, полностью удовлетворял потребностям обитателей поселения, он типичен для этой эпохи и не слишком разнообразен: резцы для обработки костного материала, скребки для выделки шкур, ножи из ретушированных пластин и пластинок, остря, проколки и т.д.

Исключительно обильна коллекция изделий из кости, рога и особенно бивня. Разнообразие приемов обработки этих материалов, богатство набора орудий охоты (наконечники копий, дротиков и стрел), предметов домашнего обихода (шилья и иглы, мотыги из ребер и бивня, молотки



*Обломок плоской кости с гравированными изображениями.*

из рога северного оленя и т.д.), масса различных украшений выделяют Юдиново из других одновременных поселений Русской равнины. За последние годы значительно увеличилась серия изделий, украшенных геометрическим орнаментом. Привлекают внимание два необычных предмета: роговой молоток, покрытый рядами шевронов, и бляшка

из бивня мамонта овальной формы с округлым отверстием в центре. Впервые обнаружены гравировки на кости, возможно, имеющие изобразительный характер.

Таким образом, повседневные заботы о строительстве жилищ, шитье одежды, о пропитании и поддержании огня не лишили обитателей Юдиново эстетического восприятия окружающего мира; оно выражалось в украшении тела и одежды, в характере орнамента предметов, свидетельствующей о чувстве ритма и гармонии. Не исключено, что столь большое внимание к «не-утилитарным» занятиям было связано с развитием абстрактного мышления и мифологическими представлениями.

**Исследования продолжаются на поселении Юдиново благодаря финансовой поддержке Российского гуманитарно-научного фонда.**

## КОРОТКО

Представители государств, чьи территории расположены по соседству с Северным Ледовитым океаном (Россия, США, Канада, Финляндия, Исландия, Норвегия, Швеция и Дания — последняя от имени Гренландии), провели конференцию (сентябрь 1996 г., Оттава) с целью координировать свою деятельность в этом регионе. Создан международный Арктический совет, предназначенный служить форумом для обсуждения различных проблем Севера, в том числе охраны природной среды.

В отличие от Антарктического договора, документ, подписанный в Оттаве, не устанавливает каких-либо

обязательных экологических стандартов, он лишь создает постоянный орган для обмена соответствующей информацией и сотрудничества. С правом совещательного голоса членами Арктического совета признаны три различные организации, представляющие национальные интересы инуитов (эскимосов).

New Scientist. 1996. V.151. № 2049. P.13 (Великобритания).

Биохимику Д.Федерби (D.Faderby; Лондонский королевский колледж) удалось в Национальном парке Хванге (Зимбабве) сфотографировать безгривого льва. Первой реакцией ученого при встрече со львом

было просто удивление, и только всмотревшись в снимок, он понял — это чудо!

Смотритель Лондонского зоопарка Д.Ричардсон (D.Richardson) отметил, что никогда не видел взрослого безгривого льва-самца даже на фотографии. Никто не встречал таких львов и в парке Хванге. Было время, однако, когда безгривые львы терроризировали население района Сабо около Момбасы (Кения). К сожалению, все они были уничтожены, но одного из них, правда уже мертвого, тогда удалось сфотографировать. Во всяком случае, безгривые львы — большая редкость в природе.

New Scientist. 1996. V.149. № 2018. P.8 (Великобритания).

**Nota bene**

Физика

**Получен жидкий металлический водород**

Несколько поколений физиков безуспешно пытались получить водород в металлическом состоянии. Согласно теоретическим предсказаниям ожидалось, что при достаточно высоком давлении и низкой температуре кристаллы водорода приобретут металлические свойства, однако все эксперименты оканчивались безрезультатно.

В 1996 г. С.Уэйр, А.Митчел, У.Неллис (S.Weir, A.Mitchell, W.Nellis; Ливерморская национальная лаборатория им.Лоуренса, США) предложили другой путь — ударные волны в жидком водороде.

В опытах слой жидкости (водорода или дейтерия) толщиной 0.5 мм заключали между двумя сапфировыми наковальнями, охлажденными до низкой температуры. Из газовой пушки выстреливали в наковальню металлическим диском (его скорость могла достигать 7.33 км/с). При ударе о наковальню в жидкости рождалась ударная волна, давление в которой в различных опытах варьировалось от 93 до 180 ГПа. Жидкость нагревалась до температуры 2200—4400 К, что не приводило к заметной диссоциации молекул.

Менее чем за 1 нс жидкая среда приходила в тепловое равновесие, кото-

рое сохранялось в течение нескольких сот наносекунд. За это время электронные быстродействующие устройства успевали измерить электропроводность вещества, заключенного между наковальнями.

В интервале давлений 93—140 ГПа удельное электросопротивление вещества как функция давления экспоненциально падало более чем на три порядка, что отвечало ожидавшемуся поведению полупроводника, сопровождающемуся уменьшением запрещенной зоны. Выше 140 ГПа электросопротивление практически не менялось, оставаясь около 500 мкОм·см, что сравнимо с удельным сопротивлением жидких щелочных металлов.

На основании анализа экспериментальных данных исследователи заключили, что при температуре около 3000 К и давлении 140 ГПа наблюдался фазовый переход в молекулярное металлическое состояние.

Можно полагать, что это открытие вызовет пересмотр ряда физических моделей (относящихся, в частности, к попыткам осуществить термоядерную реакцию с помощью лазера), а также космологических теорий.

Physics Today. 1996. May. P.17—18 (США).

Космические исследования.  
Геофизика

**Картирование магнитосферы Земли**

Как известно, 4 июня 1996 г. с космодрома Куру во Французской Гвиане (Южная Америка) состоялся запуск ракеты «Ариан-5», принадлежащей Европейскому космическому агентству. Ей предстояло вывести на орбиту четыре идентичных спутника, которые, расположившись в определенном порядке и составив единую систему «Cluster» («Созвездие»), должны были провести съемку земной магнитосферы, с тем чтобы специалисты смогли построить первую ее трехмерную карту. Однако менее чем через 40 с после старта ракета резко отклонилась от заданного курса, и по автоматической команде произошло ее самоуничтожение<sup>1</sup>.

Все четыре ИСЗ погибли (убыток агентства составил около 800 млн долл.). Нанесен существенный ущерб геофизике: «Cluster» должен был войти в состав международной системы спутников, предназначенных для изучения солнечно-земных связей. Нынешнее состояние бюджета Европейского космического агентства не позволит в ближайшее время возобновить этот проект в полном объеме.

Научный программный комитет агентства принял решение выделить средства на сооружение аппарата «Phoenix» из оставшихся в запасе частей системы «Cluster». Кроме того, рассматривается вопрос о за-

<sup>1</sup> См. также: Первая жертва космического столкновения // Природа. 1997. № 6. С. 93.

пуске трех меньших, менее дорогостоящих ИСЗ, способных выполнить хотя бы часть поставленных ранее задач.

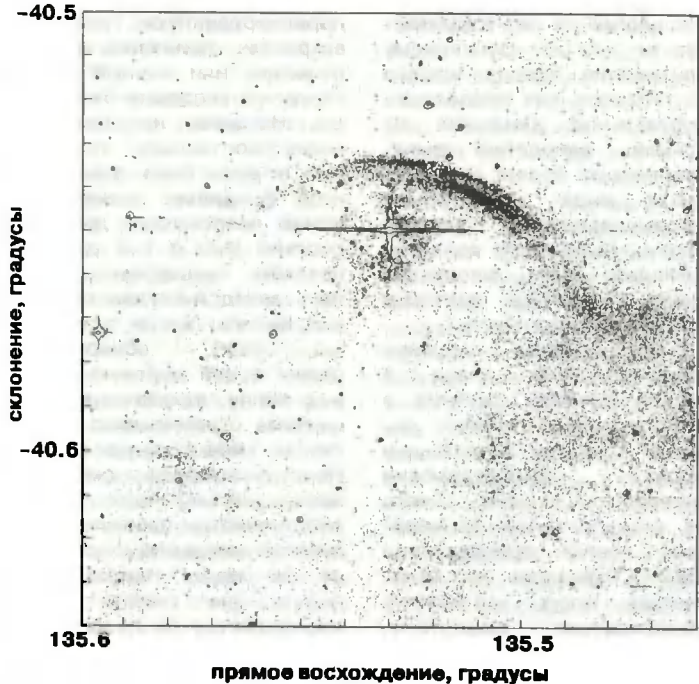
Science News. 1996. V.150. № 4. P.59 (США).

Астрофизика

**Загадка «убегающих звезд» решена**

Эта проблема 35 лет не давала астрономам покоя. Среди множества молодых массивных звезд, недавно родившихся из межзвездного газа и медленно дрейфующих вместе с ним в диске Галактики, нашлось несколько стремительно летящих в разных направлениях со скоростями более 100 км/с. Что послужило источником гигантской кинетической энергии этих звезд? Как успели они набрать такую большую скорость за свою весьма короткую жизнь? Среди нескольких гипотез, предложенных для объяснения этого явления, особенно привлекательной оказалась идея А.Блау, предположившего в 1961 г., что массивная звезда вылетает со своей орбиты в двойной системе, как из пращи, в тот момент, когда ее соседка взрывается как сверхновая. Однако доказать эту гипотезу удалось не сразу.

Молодые массивные звезды, как правило, расположены далеко от Солнца, поэтому измерять их скорости непросто. Особенно это трудно сделать, если речь идет о перемещении звезды поперек луча зрения: оно становится все менее заметным по мере увеличения расстояния до звезды. Однако движение



*Изображение молодой массивной звезды HD 77581, полученное на 1.5-метровом Датском телескопе ЕЮО в линии излучения водорода H $\alpha$ . Над звездой видна лобовая ударная волна, возбужденная ее движением в межзвездном газе.*

многих «убегающих звезд» столь стремительно, что заметить это перемещение удастся всего за несколько десятилетий наблюдения за ними (в иных случаях на это требуются сотни лет). Другие проявляют себя иначе: двигаясь со сверхзвуковой скоростью сквозь межзвездный газ, они возбуждают лобовую ударную волну, подобно сверхзвуковому самолету. Разница лишь в том, что волну от самолета мы слышим, а от звезды — видим, поскольку сжатый и нагретый межзвездный газ светится довольно ярко.

Понятно, что, измерив скорость звезды и оценив ее возраст, нетрудно уз-

нать, откуда она начала свой полет. Оказалось, что большинство таких звезд убежало из OB-ассоциаций — звездных группировок, состоящих из десятков и сотен горячих массивных звезд спектральных классов O и B. Впрочем, ничего удивительного в этом нет, поскольку именно в OB-ассоциациях формируется большинство звезд Млечного Пути. Какова же причина «отрыва от коллектива» отдельных его членов? В принципе, не исключено, что случайное гравитационное влияние соседней существенно ускорит некоторые звезды. Но большинство астрономов все же верило в гипотезу Блау. Она привлекает своей простотой: известно, что многие звезды образуют двойные системы, а все массивные звезды в конце своей короткой жизни взрываются как сверхновые. Следовательно, если оба компонента двойной системы имеют

большую массу и более массивный из них взрывается, то другому, лишенному притяжения соседа, ничего не остается, как продолжать орбитальное движение по прямой, наподобие выпущенного из пращи камня. В таком виде идея была сформулирована самим Блау. Но по мере развития взглядов на эволюцию звезд в двойных системах сценарий усложнялся.

Современная картина взаимодействия звезд в тесной двойной системе в значительной степени создана трудами Э. ван ден Хювела (Амстердамский университет), ныне одного из руководителей Европейской южной обсерватории (ЕЮО). Оказалось, что такие звезды могут интенсивно обмениваться веществом, причем та, что вначале была массивнее и первой достигла конца своей эволюции, накануне гибели может «перелить» значительную часть массы на соседку. Отдав свою массивную оболочку, эта звезда все равно взрывается как сверхновая, мгновенно разбросав остатки вещества в пространство и тем самым существенно «облегчив» систему. Сохраняется лишь маленькое ядрышко взорвавшегося гиганта, превратившееся в нейтронную звезду (пульсар) или в черную дыру. Нормальный же компаньон, перестав ощущать притяжение соседа, отправляется в путь в полном соответствии с идеей Блау. Но, став массивнее, он теперь может прихватить с собой похудевшего соседа. В этом и состоит развитие гипотезы Блау: даже после взрыва сверхновой и начала стремительного полета обе звезды (или то, что от них осталось) продолжают совместную жизнь.

Желая проверить модернизированную гипотезу, астрономы принялись искать пульсары или черные дыры рядом со звездами-беглецами. Наконец, недавно находка состоялась, причем, как в известном анекдоте, «под фонарем»: давно знакомая астрономам двойная система Vela X-1 с рентгеновским пульсаром оказалась звездой-беглецом. Это выяснилось, когда астрономы ЕЮО<sup>1</sup> обнаружили рядом с ней лобовую ударную волну, показавшую, что система стремительно летит сквозь межзвездную среду. Пространственная скорость звезды, измеренная по ее собственному движению и лучевой скорости, составляет 90 км/с. Направление полета (на север) легко определяется по положению ударной волны. Проследив траекторию полета в обратном направлении, астрономы определили, что 2,5 млн лет назад (это эволюционный возраст системы) она вылетела из звездной ассоциации Vela OB1. Все сомнения в справедливости гипотезы Блау исчезли.

Кстати, сам профессор Блау (Adriaan Blaauw), чья гипотеза теперь стала теорией, является одним из основателей ЕЮО; он был ее директором (1970—1974) и написал книгу об истории этого высокопрофессионального астрономического учреждения.

© В.Г.Сурдин,  
кандидат физико-математических наук  
Москва

## Планетология

### Кольца Сатурна «помолодели» под дождем

До сих пор считалось, что кольца Сатурна возникли около 100 млн лет назад вследствие того, что поблизости от него столкнулись два каких-то небесных тела диаметром примерно 200 км и развалились на бесчисленное множество обломков, образовавших «хоровод» вокруг планеты.

С опровержением этой гипотезы выступила Р.Пранжэ (R.Prançge; Институт космической астрофизики в Орсе, Франция).

Вместе с французскими, американскими и канадскими коллегами она проанализировала поступившие в Космического телескопа им.Хаббла данные об излучении Сатурна, наблюдавшегося в ультрафиолетовой части спектра.

Изучению подверглись области планеты, где особенно активно происходит поглощение излучений водяными парами. Оказалось, что в районе 33° ю.ш., где магнитно-силовые линии Сатурна сгущаются, пересекая его самое внутреннее из колец, содержится в 5—10 раз больше влаги, чем в районе 15° с.ш., где магнитное поле незначительно. По-видимому, ионы воды перемещаются от кольца к поверхности планеты по магнитно-силовым линиям, не распространяясь при этом равномерно.

Это — первое свидетельство существования на Сатурне мощной «дождевой» системы. Астрономы и ранее отмечали, что в его атмосфере содержится много «излишней» воды, но ее происхождение оставалось неизвестным. Прежние наблюдения свидетельствовали: вокруг колец располагается

<sup>1</sup> Капер L., Лоон J. van, Augusteijn Th., Goodfroom P., Патат F., Zijlstra A., Waters R. // ESO Press Release. PR 01/97. 15 January 1997.

диффузное облако водяных паров и ионов, откуда, можно полагать, молекулы воды попадают в атмосферу. Теоретики выдвигали гипотезу, согласно которой ионы от колец способны перемещаться по магнитно-силовым линиям вниз, к самой планете, но проследить такой процесс на молекулярном уровне до сих пор не удавалось.

Новые данные заставляют решительно пересмотреть представления о возрасте самих колец. При наблюдаемой интенсивности потери ими влаги возраст не может превышать 30 млн лет (в противном случае кольцо давно бы «истощилось»). Это вдвое меньшая величина, чем утверждалось доселе.

Специалисты полагают, что влага испаряется с частиц кольца в результате ударов микрометеоритов. Дальнейшая судьба водяных молекул зависит от их заряда и расстояния до планеты: нейтральные молекулы падают обратно на поверхность кольца, а ионизованные двигаются по спирали, «нависаясь» на магнитно-силовые линии. За внешним краем внутреннего кольца магнитные линии уносят частицы от планеты, а в низких широтах направляют их к ее поверхности.

Выступавшие в дискуссии астрономы не нашли оснований отвергнуть новую теорию, столь радикально изменяющую все представление об эволюции и возрасте колец Сатурна.

New Scientist. 1996. V. 152. № 2053. P.18 (Великобритания).

Физика

## Приметы новой физики или артефакт?

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) физики столкнулись

с удивительным явлением. Работая на Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP), они наблюдали в течение последнего года 18 событий, не укладывающихся ни в один из современных вариантов теории элементарных частиц. В каждом из этих случаев ALEPH — один из четырех гигантских детекторов, собирающих потоки частиц из области столкновения встречных пучков, — регистрировал по четыре струи, величина полной массы которых не соответствует энергии столкновения в 106 Гэв.

Исследователи пытаются осознать полученные результаты. Списывать их на ошибки эксперимента пока не удалось. Предположение же, что при каждом электрон-позитронном столкновении рождается пара неизвестных доселе частиц, которые далее быстро распадаются, порождая струи, вызывает возражение у теоретиков: в современной физике кандидатов на роль таких частиц нет.

Поначалу появление нескольких событий в экспериментах 1995 г. воспринималось большинством физиков как артефакт. В экспериментах, проведенных позднее, — при более высоких энергиях — снова было зарегистрировано несколько аномальных событий. Притом фиксирует их только один из детекторов, остальные не показывают ничего сверхъестественного.

«Если собрать все данные вместе, то наблюдаемый эффект приобретает определенную значимость», — отметил один из специалистов детектора ALEPH Дж.Томпсон (J.Thompson; Эпплтонская лаборатория им.Резерфорда, Оксфорд, Великобритания), подогрев тем самым интерес к этим результатам. «Но если там

что-то есть, то почему остальные три детектора не видят ничего?» — резонно спрашивает другой специалист ALEPH П.Дорнан (P.Dorran; Королевский колледж, Лондон, Великобритания).

Итак, если Томпсон и его коллеги полагают, что ошибка в экспериментах вряд ли возможна, то теоретики сомневаются, что детектор ALEPH приоткрыл занавес в новую физику. Прояснить ситуацию должны помочь результаты экспериментов на LEP, начатых в мае 1997 г. Пока же физики теряются в догадках: то ли они имеют дело с вершиной айсберга, большая часть которого скрыта от наблюдателей, то ли это — маленькая льдинка, которая вот-вот бесследно растает.

Science Online at <http://www.sciencemag.org> / 2 January 1997.

Физика

## Чет-нечет у наночастиц

Согласно предсказаниям квантовой механики, физические свойства мельчайших частиц размером в несколько нанометров, т.е. состоящих всего из нескольких сот или тысяч атомов, должны заметно отличаться от свойств более массивных частиц того же вещества. В частности, должны различаться термодинамические свойства металллических наночастиц с четным и нечетным числом электронов проводимости.

Недавно были опубликованы данные о необычном электросопротивлении углеродных нанотрубок<sup>1</sup>. Кванто-

<sup>1</sup> Подробнее см., напр.: Электросопротивление единичных углеродных нанотрубок // Природа. 1997. № 1. С. 107—108.

вые свойства наночастиц проявлялись также в экспериментах по туннелированию. Но все попытки наблюдать отличие термодинамических свойств сверхмалых образцов от свойств массивных до сих пор не имели успеха.

Причина неудач была, вероятно, связана с тем, что не существовало методов получения необходимого количества наночастиц, достаточно однородных по размеру и составу. Теперь разработан метод химического синтеза металлоорганических кластеров с требуемой однородностью и получен, в частности, ряд соединений палладия с общей формулой  $PdPhen_mO_n$ , где  $l$  может иметь одно из «магических» значений: 561, 1415 или 2057. Phen здесь обозначает молекулу фенантролина, а целые числа  $m$  и  $n$  для каждого из указанных  $l$  имеют вполне определенные значения. Атомы палладия образуют металлическую сердцевину кластера, причем все кластеры в ансамбле идентичны по составу, а следовательно, и размеру.

Ю. Волокитин с группой соавторов (Y. Volokitin; Лаборатория им. Камерлинг-Оннеса, Лейденский университет, Нидерланды) в интервале температур от комнатной до 50 мК измеряли теплоемкость и магнитную восприимчивость образцов массой 20–80 мг, состоящих из большого числа монодисперсных наночастиц диаметром 15 нм и менее.

До температур в несколько кельвин теплоемкость уменьшалась пропорционально  $T$ , как и в массивных металлах. При дальнейшем охлаждении, когда средняя энергия  $kT$  теплового возбуждения электронов падала до значения, равного приблизи-

тельно половине разности  $\delta$  между уровнями размерного квантования ( $kT \leq 0.5\delta$ ), теплоемкость начинала убывать пропорционально  $T^2$ , как и предсказывает теория квантово-размерных эффектов.

Работая на СКВИДе (сверхпроводящем квантовом измерителе магнитного поля) собственной конструкции в режиме переменного тока, авторы обнаружили необычную температурную зависимость магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) образцов в низкотемпературной части диапазона. В отсутствие внешнего магнитного поля был зафиксирован довольно значительный подъем  $\chi$  при охлаждении образцов ниже температуры  $T \leq 0.5\delta/k$  (особенно для кластеров с наименьшим числом оболочек), а при дальнейшем охлаждении — спад  $\chi$  до нуля. Для массивного палладия восприимчивость должна оставаться постоянной, а в режиме размерного квантования или бесконечно возрастать при  $T \rightarrow 0$  (для образцов с нечетным числом электронов), или, наоборот, стремиться к нулю — для четно-электронных частиц.

Немонотонный характер зависимости  $\chi(T)$  авторы объясняют на основе теории квантового размерного эффекта с учетом кооперативных магнитных эффектов, причем подавление  $\chi$  при  $T \rightarrow 0$  они не связывают с наличием магнитных примесей, к которым обычный металлический палладий весьма чувствителен. В таком случае влияние примесей должно было одинаково сказываться для образцов разных размеров, а этого как раз и нет.

Ответственная за рост  $\chi$  при  $T \rightarrow 0$  часть кластеров с нечетным числом электронов проводимости в их

металлических сердцевинах имеет нескомпенсированные спины. Корреляции между спинами ближайших частиц при  $T \rightarrow 0$  порождают ближний магнитный порядок, аналогично тому, что имеет место в магнитных стеклах. В результате каждый спин оказывается во внутреннем поле величиной  $\sim 0.1$  Тл (при равном числе четно- и нечетно-электронных кластеров). По теории же, в полях с индукцией  $B \geq 0.02\delta/\mu$  (где  $\mu$  — спиновый магнитный момент наночастицы) намагниченность должна испытывать насыщение при охлаждении до температур  $T \leq 0.02\delta/k$ , что и означает наблюдаемое экспериментально спадание восприимчивости до нуля.

Итак, впервые обнаружено проявление квантово-размерных эффектов в термодинамических и магнитных измерениях. Если во внимание принять различие в поведении частиц с четным и нечетным числом электронов, то предложенная теоретическая модель адекватно описывает низкотемпературные свойства молекулярных кластеров.

Nature. 1996. V.384. № 6610. P.612–613, 621–623 (Великобритания).

Биология

## Родившимся в космосе вход на Землю воспрещен?

Давно известно, что будущей матери не следует курить, пить спиртное и употреблять многие лекарства; теперь к списку табу можно, по-видимому, прибавить космические путешествия. Этот вывод следует из

доклада Дж.Альбертса и Э.Ронки (J. Alberts, A. Ronca; Университет штата Индиана, Блумингтон, США) на конференции Американского психологического общества (июль 1996 г., Сан-Франциско).

Наблюдения велись за воздействием невесомости на организм беременной крысы в условиях космического полета. Через 9 сут. после зачатия крыс отправляли в космос на борту «шаттла», где они проводили еще 9 дней, т.е. 40% всего срока вынашивания потомства. Находясь на орбите, подопытные самки вполне нормально набирали вес и были, как обычно, активны, т.е. ничем не отличались от контрольных беременных самок, содержащихся в контейнере на Земле при той же температуре и давлении.

Различия наступали после посадки. За родами наблюдали с помощью видеокамер: судя по изображениям крысы-космонавтки испытывали вдвое больше схваток (около 100), чем остававшиеся на Земле. Экспериментаторы объясняют это ослаблением мускулатуры, вызванным пребыванием в невесомости.

Спустя 2 ч после посадки биологи начинали измерять пульс у еще не родившихся крысят, меняя при этом положение самки в пространстве. Обычно такое «упражнение» вызывает у крысиного зародыша учащение пульса всего на 1.5%, однако у летавших в космос пульс, наоборот, падал — на 8%. Такая крайняя чувствительность к смене ориентации тела может отражать нарушения в работе вестибулярного аппарата, обусловленные невесомостью. Нервная система подопытных «не привыкла» к действию тяжести

на Земле. Однако впоследствии развитие молодых крыс идет нормальным путем. Таким образом, основная проблема, видимо, связана не с жизнью в космосе, а с жизнью после приземления, при переходе от условий микрогравитации к земному тяготению.

New Scientist. 1996. V.151. № 2038. P.9 (Великобритания).

#### Биология

### Феномен яйцеживорождения

Большинство пресмыкающихся размножается откладкой яиц, но среди чешуйчатых — ящериц и змей — довольно распространено и яйцеживорождение. В разных группах (семействах и родах) явление рождения детенышей представлено по-разному. Так, все агамы и дибамусы размножаются только откладкой яиц. Но есть таксономические группы, состоящие исключительно из живородящих видов, например гадюки рода *Vipera*. Многие рода представлены как живородящими, так и яйцеживорождающими видами. Так, два варианта размножения ящериц рода *Lacerta* демонстрируют наши самые обычные ящерицы — прыткая и живородящая. Все это позволяет систематикам использовать способ размножения как определяющую характеристику таксона (вида, рода, семейства) пресмыкающихся.

Но в природе, очевидно, ничто не бывает слишком схематично и однозначным. Ситуация с соотношением живорождения и откладки яиц у пресмыкающихся оказывается довольно запу-

танной. Именно такой пример представляет упомянутая уже наша привычная живородящая ящерица. Вопреки своему традиционно названию (а живородящей она называется не только по-русски, это же значение она имеет и во многих других европейских языках) в некоторых районах ареала она не приносит детенышей, а откладывает яйца. Феномен этот интенсивно исследуется в ряде европейских научных центров, где пытаются определить, почему в одних популяциях этого вида самки откладывают яйца, а в других — рожают детенышей. Связано ли это с особенностями мест обитания конкретных популяций или с особенностями самих ящериц? Если последнее, то речь идет о генетически закрепленных или приобретенных в онтогенезе различиях между популяциями? И вообще, не объединяют ли под названием «живородящая ящерица» популяции, в действительности относящиеся к разным видам, различающимся не только способом размножения, но также экологическими потребностями и генетическим набором?

Еще один удивительный тому пример обнаружен недавно в Северной Аргентине. Здесь встречается широко распространенная в Южной Америке игуановая ящерица *Liolaemus a. alticolor*. Для этого вида характерна та же ситуация, что и для нашей «живородки»: в одних популяциях самки откладывают яйца, в других размножаются живорождением. Явление это было уже известно по другим частям ареала этой ящерицы, и исследователи из колумбийского Индустриального университета и из аргентинского Герпетологи-

ческого института<sup>1</sup> выполняли вполне рутинную работу, анализируя половые продукты 182 самок аргентинских лиолемусов, хранящихся в музейных коллекциях.

Они установили, что и в Аргентине есть как яйцекладущие, так и живородящие популяции. Внешне особи из тех и других никак не различаются, но живородящие обитают на нескольких больших высотах (кстати сказать, «живородящие» популяции нашей живородящей ящерицы также встречаются в более северных и более высоких местах обитания, т.е. там, где меньше необходимого для инкубации яиц тепла). Впрочем, и это — высотное — различие весьма незначительно. Но исследователи обнаружили и поистине неожиданное явление: в одном месте (в одной популяции!) жили и яйцекладущая, и живородящая самки.

По-видимому, эта находка внесет существенные коррективы в представления о феномене яйцекладения у чешуйчатых пресмыкающихся. Сами авторы осторожно высказывают два предположения. Если опираться на распространенное мнение о таксономической значимости характера размножения, то одновременное существование обоих способов размножения не только в разных популяциях одного вида, но и в пределах одной популяции можно интерпретировать в пользу гипотезы существования видов-двойников, сходных внешне по своим экологическим характеристикам, но генетически различных. Другое объяснение предпо-

лагает, что исследованный лиолемус находится на самой критической стадии эволюционного становления яйцевиворождения.

© Д. В. Семенов,  
кандидат биологических  
наук  
Москва

#### Биология

### Поражение в турнире подавляет брачное поведение

Как известно, турниры в брачный сезон широко распространены в животном мире. Наблюдаются они и у змей: это «брачные танцы», во время которых противники обвивают друг друга, стараясь придавить конкурента к земле. При этом змеи никогда не причиняют противнику повреждений, и турнир скорее имеет ритуальный характер. Никаких физических издержек побежденный не несет: единственная утрата — территория, которая (обычно с самкой) остается победителю. Казалось бы, ползи искать другую самку, с которой, может, и повезет. Но, оказывается, ситуация не столь проста.

Американский исследователь Г. Шуетт (G.W. Schuett; Аризонский западный университет) провел специальный эксперимент с целью выяснить, как влияет поражение в турнире на брачное поведение самцов медноголового щитомордника (*Agkistrodon contortrix*) — одного из самых обычных и широко распространенных видов ядовитых змей Северной Америки, часто используемых в качестве объекта научных исследований. Эксперимент проводился с

большой искусственной (живущей в неволе) колонией этого вида и состоял из трех основных этапов. На первом отбирали самцов, у которых хорошо проявлялось брачное поведение (индивидуальные особенности и специфика лабораторных условий приводят в ряде случаев к заторможенности тех или иных поведенческих реакций). Степень выраженности брачного поведения определяли по четырехбалльной шкале и для дальнейшей работы использовали только высокоактивных змей (3—4 балла). Затем отобранных самцов сажали попарно в присутствии самки, что вызывало характерное турнирное поведение. Определив таким образом победителя и побежденного в каждой паре, экспериментатор опять сажал каждого самца с самкой и вновь оценивал выраженность брачного поведения — через 30 мин после турнира, через 24 ч и через неделю.

Выяснилось, что брачная активность победителей не изменялась, а у побежденных полностью оказывалась подавленной (хотя другого самца поблизости не было). Через сутки она еще оставалась существенно слабее, чем до эксперимента, и лишь через неделю брачная активность восстанавливалась.

Таким образом, поражение в брачном турнире не просто приводит к утрате одного из многих шансов оставить потомство, но надолго (в сравнении с относительно непродолжительным периодом брачного сезона) «выбивает побежденного из колена»: поражение вызывает стресс, который снижает репродуктивные возможности побежденного и повышает их у победителя.

<sup>1</sup> Ramirez P.M.P., Raymond L. // Bull. of the Maryland Herpetological Soc. 1996. V.32. № 1. P.1—15.



Хотя и бескровный, турнир тем не менее оказывается весьма эффективным средством конкуренции за возможность оставить потомство.

Zoo Biology. 1996. V.15. № 3. P.209—221 (США).

Зоология

**Нужно ли паукам-волкам зрение?**

Известно, что пауки ориентируются в основном по вибрационным сигналам — сотрясению субстрата, колебанию воздуха. Зрение и обоняние не играют столь важной роли в жизни пауков, как механорецепция. Только пауки-скакуны обладают высокоразвитой зрительной системой. Однако досконально роль зрения до сих пор не оценивалась.

Арахнолог Дж.С.Ровнер (J.S.Rovner; провел детальное исследование роли зрения в жизни пауков-волков (*Rabidosa rabida*). В опытах их глаза покрывали специальной краской, а затем сравнивали поведение «слепых» и зрячих пауков.

Ровнеру удалось показать, что ни зрячие, ни слепые пауки не опознают неподвижного или медленно движущегося сородича без непосредственного контакта. Слепые самцы лучше опознают подвижную самку, чем подвижного самца. Слепые самки точно ориентируются на самцов, проявляющих поведение ухаживания (обычно самцы постукивают ногами и брюшком по субстрату). Слепые самцы могут проявлять поведение ухаживания рядом с другими самцами. Таким образом, химический механизм

опознания пола у данного вида работает плохо. В отличие от пауков-скакунов паукам-волкам не нужно зрение для ритуальной борьбы между самцами.

Итак, пауки-волки (по крайней мере, рабидоза) не способны распознавать форму. Они ориентируются только на движение. Однако зрительная система обеспечивает более точный прямой сбор информации и на большем расстоянии, чем это делает механорецепция. Именно зрительная система позволяет опознать пол. Но одной лишь механорецепции вполне достаточно, чтобы установить отношения доминантности между самцами. Остается неясным, насколько зрение рабидозы эффективно в ночное время, в сумерках или при свете луны (что известно для некоторых других видов бродячих пауков).

Journal of Arachnology. 1996. V.24. № 1. P.16—23 (США).

Медицина

**Чай, флавоноиды и болезни сердца**

По некоторым данным, содержащиеся в чае антиоксиданты — флавоноиды — могут снижать риск сердечных приступов. Несколько более сложной представляется такая взаимосвязь по результатам обследований, проведенных в Гарвардской школе общественного здравоохранения (Бостон, штат Массачусетс) под руководством Э.Б.Римма (E.B.Rimm). В ходе анкетирования почти 35 тыс. взрослых мужчин с высшим образованием были собраны сведения о по-

треблении ими чая, лука, спаржи, яблок, цитрусовых и некоторых алкогольных напитков, содержащих флавоноиды. За шесть лет около 5 тыс. человек, находившихся под наблюдением, перенесли сердечный приступ. Учтя все остальные обстоятельства, вызывающие риск такого заболевания, Римм не нашел доказательств того, что диета, содержащая обильные флавоноиды, может оказывать профилактическое действие. Однако потребление значительного количества флавоноидов теми лицами (около 5 тыс. обследованных), у которых ранее уже были симптомы коронарных болезней, снижало риск сердечного приступа в среднем на 40% по сравнению с теми, у кого в пище таких веществ было совсем мало. Но все это — в отношении лука, спаржи, яблок, лимонов и спиртного. Что же касается чая, то группа Римма никакого защитного эффекта для «сердечников» в нем вообще не обнаружила. А это противоречит результатам исследований, проводившихся главным образом в Европе.

Science News. 1996. V.150. № 10. P.150 (США).

Медицина

**Контроль за распространением болезни Шагаса**

Болезнь Шагаса (или трипаносомоз) — хроническое неизлечимое паразитарное заболевание, распространенное только на Американском континенте. Вызывается паразитом *Trypanosoma cruzi* и передается при укусах кровососущего клопа *Triatoma interstans*.

Через 10—20 лет после острой стадии заболевания у одной трети инфицированных развиваются расстройства пищеварения, нервной системы и сердечной деятельности. Трипаносомоз вызывает потерю дееспособности и даже смерть<sup>1</sup>.

В странах Латинской Америки зарегистрировано 16—18 млн инфицированных, причем Бразилия является крупнейшим очагом трипаносомоза (40% заболеваний). Однако по сообщению ВОЗ, распространение этой болезни в Бразилии приостановлено; успешно проходит Национальная программа по ее искоренению: если в 1970 г. болезнью были охвачены 711 муниципалитетов (36% всей площади страны с населением 49 млн), то к 1993 г. заболевания зарегистрированы только в 83 муниципалитетах, что соответствует снижению эпидемии на 89%. Поскольку передающий инфекцию клон селится в жилищах низкого качества, в 1995 г. работники национальной программы провели обследования таких построек: в 709 012 домах ими отловлено в среднем по 2,5 насекомых на каждую 1000 домов. Такая величина значительно ниже порога, необходимого для распространения трипаносомоза.

Еще в 1991 г. министры здравоохранения Аргентины, Боливии, Бразилии, Чили, Парагвая и Уругвая выступили с инициативой попытаться приостановить распространение болезни Шагаса. По данным на сегодня: в Уругвае передача инфекции была остановлена в 1996 г.; в Чили

этого удастся достигнуть в 1997 г., в Бразилии в — 1998 г., в Аргентине — в 1999 г.; в Боливии и Парагвае еще невозможно оценить время ее приостановки. Ситуация остается серьезной и в других частях континента. Например, недавно обследованные в Гондурасе выявило почти 300 тыс. инфицированных. Около 20% из них могут умереть от этой болезни, но типу похожей на сонную.

World Health Organization. Press Release № 4. 16 January 1997 (Швейцария).

вредные выбросы не применяются в случае ухода этих выбросов за пределы страны.

На совещании принято решение разработать единые стандарты и порядок измерения степени загрязненности воздушного пространства, чтобы сделать возможным надежные сравнения; постановлено также создать в ключевых районах трех этих стран специальные пункты измерения потоков загрязняющих веществ.

New Scientist. 1996. V.151. № 2042. P.13 (Великобритания).

## Геология

### Охрана окружающей среды

#### Кто засоряет атмосферу соседа?

В августе 1996 г. в Торонто (Канада) состоялось совещание Международной комиссии по сотрудничеству в области охраны среды обитания.

Дело в том, что власти и природоохранные организации США давно высказывали претензии, что слабооборудованные газо- и пылеуловителями металлургические и энергетические предприятия Мексики, расположенные вблизи их общей границы, сильно загрязняют воздушный бассейн страны; особенно страдают приграничный город Сан-Диего и вся южная часть штата Калифорния. Аналогичным образом атмосфера Канады загрязняется переносимыми ветром выбросами транспорта и промышленных предприятий из индустриально развитых среднезападных и восточных штатов США. При этом довольно суровые американские законы об ответственности за

#### 166-й рейс «ДЖОЙДЕС Резолюшн»

Начиная с конца 70-х годов, когда на основе сейсмостратиграфических исследований была построена первая детальная кривая изменений уровня океана, проблема эвстатических колебаний в мезозое и кайнозое постоянно находится в центре внимания геологов и океанологов. В том или ином виде изучение этого явления входит в число задач практически всех рейсов, выполняемых в рамках Программы океанского бурения. Учитывая важность проблемы для расшифровки эволюции процесса накопления осадков в океане (и не только в океане!), предпринимаются целенаправленные исследования, посвященные причинам эвстатических колебаний, характеру их проявлений в осадках, оценке их масштаба и периодичности. Следы колебаний уровня океана в наиболее выраженной форме запечатлены в осадочных разрезах пассивных континентальных окраин Атлантического океана. По

<sup>1</sup> Подробнее см.: Болезнь Шагаса — угроза не только Латинской Америке // Природа. 1992. № 12. С.115.

данным сейсмостратиграфии, в них фиксируется множество отражающих горизонтов. Как показало бурение на континентальной окраине Западной Атлантики, в районе Нью-Джерси (150-й рейс «ДЖОЙДЕС Резолюшн»), происхождение большинства сейсмических границ связано с низким стоянием уровня океана.

Исследования сейсмических границ в неоген-четвертичных осадках, начатые в 150-м рейсе, были продолжены в 166-м, который состоялся 17 февраля — 10 апреля 1996 г. и проходил под руководством П.Эберли и П.Суорта (Университет Майами); научным представителем Программы океанского бурения был М.Малоне<sup>1</sup>. Бурение проводилось на западном фланге Большой Багамской банки, расположенной на континентальной окраине Северной Америки, к востоку от п-ова Флорида. Здесь, по данным сейсмостратиграфии, в неоген-четвертичном осадочном разрезе были идентифицированы и прослежены вкрест простирания склона 17 отражающих поверхностей. В рейсе предстояло: датировать сейсмические границы и соответствующие изменения уровня океана; определить влияние этих колебаний на осадконакопление, в частности — условия карбонатакопления и его особенности в периоды низкого и высокого стояния уровня океана; получить материал для изотопных исследований, которые в комбинации с данными стратиграфии могли бы подтвер-



*Район исследований в 166-м рейсе «ДЖОЙДЕС Резолюшн» в западной части Атлантического океана. Цифры на изолиниях — глубина океана в метрах; точки с номерами — скважины глубоководного бурения.*

дить (или опровергнуть) существование причинной связи между эвстатическими колебаниями и формированием сейсмических границ; оценить амплитуду и темпы изменений уровня океана на основе полученных возрастных датировок и строения осадочного разреза. Кроме того, предстояло изучить некоторые процессы диagenеза осадков, в первую очередь — поведение флюидов в осадочной толще и, в частности, выяснить, существует ли взаимный обмен между морской водой и флюидами внутри осадков.

В общей сложности было пробурено 17 скважин в семи точках, расположенных вкрест простирания склона банки (платформы) в интервале глубин 320—670 м. Максимальная глубина проникновения в осадки (1300 м) достигнута в скв. 1003. В четырех точках (скв. 103, 105—107) вскрыты миоцено-

вые осадки; в остальных скважинах бурение было остановлено в плейстоценовых осадках.

Уже предварительный анализ материалов рейса показал, что практически все его цели были достигнуты. Благодаря присутствию в осадках планктонных карбонатных микрофоссилий проведено детальное расчленение всех вскрытых разрезов с точной датировкой стратиграфических границ. Корреляция данных по литологии и внутрискважинному каротажу свидетельствует, что все выявленные в разрезе отражающие сейсмические границы совпадают с изменениями в составе осадков и темпах их накопления и генетически связаны с колебаниями уровня океана. При этом установлено, что в исследованной осадочной толще запечатлены эвстатические колебания разного порядка. Детальный лабораторный анализ биостратиграфических, литологических, палеомагнитных и изотопных данных позволит надежно оценить амплитуду и скорость этих колебаний, а также сопоставить их с глобальными океанологическими и климатическими событиями.

<sup>1</sup> Eberli G., Swart P., Malone M. et al. Preliminary Reports. Leg 166. Ocean Drilling Program. Texas, College Station, 1996

В рейсе получены интересные материалы по химическому составу поровых флюидов и их поведению в осадках. В наиболее мелко-скважинах, пробуренных непосредственно в пределах поднятия (1003—1005, 1008, 1009), в верхней части разреза мощностью 40 м отсутствуют какие-либо геохимические градиенты и поровые воды осадков практически ничем не отличаются по составу от окружающей морской воды; в несколько более глубоководных скважинах (1006 и 1007) зона слабо выраженных геохимических градиентов имеет меньшую мощность. Кроме того, в ней наблюдается несколько повышенное содержание стронция. Все это свидетельствует, что в пределах поднятия существует активный обмен между верхней частью осадочного чехла и морской водой. Механизм этого процесса пока неясен. Возможно, это связано с различием температур внутри поднятия и за его пределами, что создает разницу в давлении и способствует проникновению морской воды в осадки поднятия.

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

Геотектоника

## Величина плит земной коры

Неоднократно проводившееся математическое моделирование геодинамических процессов показывало, что тектонические плиты, образующие земную литосферу, не должны превышать в поперечнике примерно 3 тыс. км. Однако в

действительности диаметр, например, Тихоокеанской плиты достигает 12 тыс. км.

Разрешить это противоречие пытаются авторы новой модели Х.-П. Бунге и М.Ричардс (H.-P. Bunge, M.A. Richards; Университет штата Калифорния, Беркли, США), использовавшие мощный компьютер Лос-Аламосской национальной лаборатории в штате Нью-Мексико. В этой сложной модели приняты во внимание процессы, происходящие в недрах мантии Земли, и ее физические свойства, в частности ее вязкость. Модель описывает восходящие и нисходящие потоки вещества в мантии, условно разбитой на 20 млн отдельных блоков. Давление и температура в ней достигают таких величин, что порода начинает «течь» со скоростью нескольких сантиметров в год.

Большинство прежних моделей указывало, что конвекция вызывает движение вещества мантии из той ее части, которая лежит на глубине около 3 тыс. км, и переносит его затем в горизонтальном направлении на несколько тысяч километров — до области, лежащей непосредственно под литосферной плитой; затем вещество снова опускается в недра. Таким образом, фактически предполагалось, что размер плит должен соответствовать размерам этих конвекционных ячеек. Но именно это и не подтверждается истинными, много большими размерами некоторых плит.

Модель Бунге—Ричардса включает более сложные, но реальные данные. Если принять, что нижней мантии свойственна большая вязкость, чем верхней, размеры конвекционных ячеек предстают близкими к фактическим размерам плит,

образующих земную кору; если же считать вязкость в обеих областях одинаковой, конвекционные ячейки оказываются совсем небольшими. Чтобы установить роль плит в этих процессах, авторы ввели в модель упрощенное их описание. Оказалось, что без увеличения диапазона значений вязкости модель приводит к серьезному отклонению от наблюдаемых характеристик процесса конвекции. Поперечные размеры плит приближаются к реальным только в случаях, когда вязкость нижней мантии примерно в 20 раз больше, чем верхней. Отсюда вывод: не плиты, а нижняя мантия определяет поведение всей конвекционной системы.

Дж.О'Коннелл (R.J.O'Connell; Гарвардский университет, Кембридж, США) подчеркивает, что авторы впервые сумели в трехмерной модели воспроизвести движение плит земной коры планеты, имеющей сферическую форму. Так как в использованном ими упрощенном описании плит они принимаются неразрушаемыми, следующим шагом должно стать создание более реалистичной модели, предусматривающей их способность разламываться.

Geophysical Research Letters. 15 October, 1996 (США); Nature. 1996. V.379. № 6564. P.436 (Великобритания).

Геология. Охрана окружающей среды

## Запасы нефти и газа на планете: миф и реальность

Увеличение энергопотребления, прогнозируемое в материалах Института наблюдений за миром, Международной комиссии по ок-

ружающей среде и развитию<sup>1</sup> и др., ориентировано на рост добычи нефти и особенно газа. В связи с этим подчеркивается невозобновимость этих ресурсов и опасность их истощения.

М.Дюссо (M.Dusseau; Университет г.Ватерлоо, провинция Онтарио, Канада) утверждает, что истощение месторождений нефти и газа на планете — это миф: учитываются углеводороды лишь тех месторождений, разработка которых рентабельна, а это всего 5% мировых запасов. Не рассматриваются ресурсы углеводородов в виде вязких масел. В Канаде, например, запасы такого углеводородного сырья составляют около 250 млрд м<sup>3</sup>, в Венесуэле — 300 млрд м<sup>3</sup>; сравнимые по величине ресурсы подобных веществ имеются в Китае, на Ближнем Востоке, в России, так что их общее количество в два-три раза больше, чем в учтенных источниках нефти и газа.

Неизбежное в ближайшем будущем повышение мировых цен на нефть (чему, несомненно, способствуют снижение нефтедобычи в России и особенностью рыночного поведения стран — экспортеров нефти) приведет к тому, что ресурсы углеводородного сырья, рассматриваемые сегодня как непригодные к эксплуатации (нефтяные пески, небольшие, находящиеся вдали от берега морские месторождения), станут рентабельными, равно как и заброшенные, но вырабо-

ванные всего на 20—40% месторождения. Здесь должны сыграть свою роль новые технологии (термическая стимуляция подъема нефти, гравитационный дренаж, горизонтальные волновые воздействия и др.), которые существенно снижают стоимость добычи в бедных месторождениях.

Следует также иметь в виду, что 90% запасов углеводородов планеты заключено в бедном сырье, в частности в углеводородных глинистых сланцах. Такие запасы, например в штатах Колорадо и Вайоминг (США), по величине соответствуют запасам углеводородов в нефтяных песках Канады, а это означает обеспеченность запросов США на 100 лет (в расчете на современное потребление).

Богатый источник углеводородов заключен и в газификации углей, которая уже применяется в ЮАР (при нынешних темпах добычи угля его хватит на 3000 лет).

Искусственный фотосинтез, получение углеводородов из карбонатов и водорода воды, а также другие способы, альтернативные добыче нефти, лимитируются лишь стоимостью процесса их производства.

Таким образом, проблема поставлена с ног на голову: политики оперируют традиционными понятиями и цифрами об истощении ресурсов; реальный же предел потреблению углеводородов заключается вовсе не в их количестве на Земле — лимитируют его два фактора: сопровождающее сжигание топлива загрязнение окружающей среды (в первую очередь диоксидом углерода, усиливающим парниковый эффект), а также выбросы продуктов сжига-

ния бензина, удушающие население городов.

Nature. V.386. № 6620. P.12 (Великобритания).

Океанология

## Эль-Ниньо приходит все чаще и становится длительнее

Явление Эль-Ниньо — периодическое стремительное потепление вод центральной и восточной областей Тихого океана и атмосферы над ними — сопровождается снижением силы пассатов и изменением направления морских течений на обратное; кроме того, оно ответственно за мощные штормы в восточной части Тихого океана, засухи в Восточной Африке и ряд других катастрофических процессов.

Последний приход Эль-Ниньо, закончившийся в июне 1995 г. и продолжавшийся около 5 лет, — самый длительный в текущем столетии. По мнению же климатологов К.Тренберта и Т.Хора (K.Trenberth, T.Hoar; Национальный центр атмосферных исследований США, Боулдер, штат Колорадо), данный случай — беспрецедентно долгий за последние 2 тыс. лет. Они проанализировали данные о погодных условиях, характерных для Эль-Ниньо и связанной с ним Южной осцилляции (вариации атмосферного давления и циркуляции воздуха), которые были зарегистрированы метеостанцией г.Дарвин в Австралии, где подобные наблюдения непрерывно ведутся с 1882 г. Это позволило им построить математическую модель колебаний атмосферного давления; для устранения эффектов, вносимых локальными штормами, исследователи исполь-

<sup>1</sup> Brown L.R., Kone H., Roodman D.M. Vital Signs. London, 1994; Наше общее будущее / Пер. с англ. под ред. С.А.Евтеева и Р.А.Перелета. М., 1989; см. также: Бялко А.В. Динамика послевоенного мира // Природа. 1995. № 5. С.18—21.

зовали в качестве «статистического фильтра» данные метеостанции на о.Таити. Затем с помощью этой модели была построена ретроспективная картина погодно-климатических условий в данном регионе за последний миллион лет.

Оказалось, что продолжающееся несколько лет подряд явление Эль-Ниньо—Южная осцилляция должно было бы случаться не чаще одного раза в 1.5—3.0 тыс. лет. Однако в последнее время, особенно с 1976 г., оно участилось. Ученые полагают, что подобный сдвиг вряд ли может иметь естественное происхождение; по их мнению, он связан с глобальным потеплением, вызванным антропогенными факторами.

Geophysical Research Letters. 1996. V.23. P.57 (США).

#### Океанология

### Угроза затопления была преувеличена

В 1995 г. С.Нерем (S.Nerem; Университет штата Техас, США) опубликовал результаты своих исследований, свидетельствующих о том, что уровень Мирового океана поднимается ежегодно на 4 мм; дальнейшее изучение показало еще большую интенсивность процесса, а именно повышение на 5 мм/год. Между тем сеть морских уровнемеров давала вдвое меньшую величину.

С запуском франко-американского искусственного спутника Земли «TOPEX-Poseidon», на котором установлен радиолокационный выотомер, наступила новая эпоха в таких наблюдениях. Чтобы полу-

чить требуемую информацию, необходимо учитывать малое вертикальное перемещение самого спутника за время, прошедшее от момента послыки радиосигнала до его возвращения от отражаемой поверхности.

Как теперь оказалось, была допущена ошибка, так что смещение ИСЗ в ходе прежних вычислений было вдвое завышено.

Последние уточнения в расчетах показывают, что уровень моря поднимается со скоростью, не превышающей 3 мм/год, а возможно даже, что лишь на 1 мм/год.

Эти данные в некоторой мере снижают обеспокоенность населения многих островов в южной части Тихого океана, над которыми висит угроза затопления.

New Scientist. 1996. V.151. № 2041. P.13 (Великобритания).

#### Вулканология

### 800 лет активности вулкана Ясур

В 1774 г. капитан Дж.Кук, находясь в районе архипелага, которому он сам же дал название «Новые Гебриды» (ныне — Вануату), записал в вахтенный журнал, что над о.Танна (20° ю.ш., 169° в.д.) стоит облако пепла. Как установлено современными геологами, пеплопад здесь продолжается по меньшей мере 800 лет, доставляя немало неудобств жителям архипелага.

В начале и середине 1996 г. из расщелин в куполе вулкана Ясур, расположенного внутри древнего кратера Емкахе, начал бить фонтан лавы. Определить ее состав сложно из-за

часто вылетающих вулканических бомб, траектория которых непредсказуема, однако акустические и оптические измерения показывают, что их начальная скорость около 150 м/с.

В двух километрах от вершины горы в продолжение трех лет работает постоянная автоматическая телеметрическая сейсмостанция. Большинство зарегистрированных ею подземных толчков по времени совпадает с моментами повышенной вулканической активности.

Всего на Вануату около 80 вулканов. Ясур — самый молодой и наиболее активный из них.

Smithsonian Institution Bulletin of the Global Volcanism Network. 1996. V.21. № 8. P.7 (США).

#### Сейсмология

### Сейсмическое прогнозирование безнадежно?

Полный пессимизм относительно возможности надежного прогноза землетрясений высказали некоторые геофизики на состоявшейся в ноябре 1996 г. в Лондоне международной конференции. Р.Геллер (R.Geller; Токійский университет) отметил, что, несмотря на затраченные международным сообществом ученых усилия и средства, не удалось за все последние десятилетия обнаружить ни одного достойного доверия признака надвигающегося сейсмического события (некоторым сигналам, находящимся на уровне шумов или даже ниже, придавалось излишнее значение). К такому мнению присоединился С.Кремпин

(S. Crampin; Эдинбургский университет, Шотландия). Скептицизм специалистов усилился после того, как несколько греческих сейсмологов заявили, что им якобы удалось прогнозировать землетрясения по предшествующим вариациям магнитного поля Земли; в решительной критике их отчета указывалось на совершенно неопределенные сведения о месте и времени предстоящих толчков, об их интенсивности.

Многие ученые теперь полагают, что землетрясения вообще относятся к числу критических явлений, которые возникают в системе, выведенной на грань неустойчивого равновесия. Предсказать конкретно, когда произойдет критическое явление, почти невозможно; по мнению сейсмолога И. Мейна (I. Main; Эдинбургский университет), построить прогноз землетрясения столь же сложно, как заранее установить, какая именно снежинка вызовет снежную лавину в горах.

Однако, отнеся подземные толчки к разряду критических явлений, специалисты теперь могут внести новые поправки в строгительные кодексы с учетом научных критериев сейсмостойкости сооружений (существующие правила в основном опираются на голую эмпирику).

New Scientist. 1996. V.152. № 2056. P.10 (Великобритания).

#### Климатология

### Меняется ли климат России?

Вопрос о точном и детальном знании современных колебаний климата

приобрел для человечества большую остроту, в особенности в связи с судьбой морских побережий и перспективами сельского хозяйства. Оценки изменений климата подчас расходятся до совершенно противоположных значений. Тем важнее работы, основанные на большом объеме наблюдений.

Н.А.Ефимова, И.Б.Байкова, Л.А.Сорокина и И.В.Малкова (Государственный гидрологический институт) изучали (при поддержке Международного научного фонда) данные 24-летнего периода наблюдений (1967—1990). Полученные результаты убеждают, что на всей территории бывшего СССР изменения температуры воздуха имеют одинаковую направленность. Подтверждается реальность потепления климата, которое выражается в повсеместном росте температуры в зимние и летние сезоны, в дневные и ночные часы на всей территории, за исключением некоторого понижения температуры зимой на северо-западе и летом — в центре и на юге европейской части. Наиболее значительный рост температуры наблюдался в зимний сезон в Западной и Восточной Сибири.

Многолетний ход температуры воздуха был сопоставлен с изменениями облачности и количества осадков: для зимы характерна прямая, а для лета — обратная связь между этими элементами климата, что наиболее ярко проявилось в Западной Сибири.

Почти во всех регионах в зимние сезоны дневные и ночные суммы осадков примерно одинаковы. Это свидетельствует о преимущественно фронтальном их происхождении. Но из-за термической конвекции, разви-

вающейся в летнее время, дневные суммы осадков на пространстве европейской части до Восточной Сибири превышают ночные на 6—24%. В областях, примыкающих к дальневосточным морям, напротив, более значительны ночные суммы осадков, что характерно для морских побережий.

Метеорология и гидрология. 1996. № 4. С.34—41 (Россия).

#### Климатология

### Причины засухи 1996 г. в США

Весь Юго-Запад и область Великих равнин США охватила в первой половине 1996 г. жестокая засуха. На территории штатов Техас и Оклахома это был наиболее засушливый зимне-весенний период за все время регистрации метеоусловий, начатых здесь в 1895 г.

Причины, вызвавшие это стихийное бедствие, проанализировали сотрудники Центра климатического прогноза при Национальной метеослужбе США в Кемп-Спринге, штат Мэриленд, возглавляемые Р.Тинкером и Дж.Беллом (R.Tinker, G.Bell). По их мнению, засуха, сильно сказавшаяся не только в названных штатах, но также в Аризоне, Небраске и Нью-Мексико, была частью общего необычного состояния погоды во всем Северном полушарии.

Во-первых, воды центральной части Тихого океана в 1995 г. и начале 1996-го были аномально холодными. Это явление, именуемое Ла-Нинья, противоположно по характеру Эль-Ниньо — периодическому резкому повышению температуры акватории и атмо-

сферы в том же регионе. Известно, что оба явления способны сильно влиять на погодные условия в весьма удаленных областях Земли. Ла-Нинья меняет обычный порядок возникновения штормов и гроз над экваториальной частью Тихого океана. При этом район прохождения штормов, а также струйных течений в атмосфере смещается к северу, а над Юго-Западом США устанавливается область высокого давления. Устремленные к северу струйные воздушные течения вызывают необычно обильные осадки и наводнения в северо-западных штатах США, примакающих к Тихому океану.

Во-вторых, масштабы засухи увеличило еще одно, выявленное теперь исследователями, звено событий: возникновение уникальной циркуляции воздушных масс над Северной Атлантикой. Подобно Эль-Ниньо, это явление, именуемое Северо-атлантической осцилляцией, складывается из противоположных друг другу фаз. Так называемая негативная фаза связана с более низким относительно многолетней нормы атмосферным давлением над Центральной Атлантикой и ослаблением потока увлажненного воздуха, поступающего из Мексиканского залива на территорию США. Известно, что обычно этот поток, как и штормы в Тихом океане, служат главным источником осадков над Великими равнинами США, захватывающими территорию 1 штатов Небраска и Оклахома.

Столь резко осложнившиеся в 1995—1996 гг. метеоусловия проявляли подобную тенденцию в продолжение последних 20 лет; еще в конце 70-х годов Эль-Ниньо отличался повышенной активностью, что в

равной мере относится и к позитивной фазе Североатлантической осцилляции.

Специалисты пока не считают себя готовыми к выработке надежного долгосрочного прогноза подобного явления, что могло бы предотвратить миллиардные убытки в сельском хозяйстве.

Science News. 1996. V.150. № 1. P.5 (США).

#### Метеорология

### Искусственный дождь: новый метод

Искусственное вызывание осадков осуществляется с 40-х годов. Наиболее успешными были эксперименты, в которых с самолета, летящего над облаками, рассыпался порошок кристаллического иодистого серебра, обладающего сходной со льдом структурой. Но эта методика применима в случае высокой облачности: при охлаждении вершечек таких облаков ниже 0°C влага в них не замерзает, а приобретает свойство переохлажденной жидкости; посыпая эти скопления влаги иодистым серебром, можно интенсифицировать образование ледяных кристаллов, которые затем тают и выпадают на землю дождем. Однако стоимость такой работы высока, а эффективность не столь уж велика: количество осадков удается увеличить всего на 10—15%.

Иной метод предложил специалист по физике атмосферы Г.Матер (G.Mather), создавший для этого компанию «Cloudquest» в Южно-Африканской Республике.

Еще 25 лет назад он обратил внимание на то, что облака, собирающиеся над местной бумажной фаб-

рикой, временами разряжаются необычайно обильными осадками. Исследования показали, что «дополнительные» дожди связаны с атмосферными частицами, которые выбрасываются в воздух при изготовлении бумажной массы. С 1990 г. Матер стал проводить эксперименты, в ходе которых с помощью факелов в атмосферу вводились частицы хлористого калия. Факелы устанавливали на плоскостях легкого двухмоторного самолета, который пролетал не над верхушками облаков, а под облаками. В течение 4 мин с факелов попадало в облако около 1400 г твердых частиц.

В естественных условиях из облака выпадает всего около 30% содержащейся в нем влаги. По утверждению автора, его методика позволяет довести это количество до 70%.

В 1995 г. Национальный центр атмосферных исследований США (Боулдер, штат Колорадо) поставил серию экспериментов над засушливой территорией штата Аризона. В результате применения новой методики количество осадков удавалось повысить на 30—60%.

New Scientist. 1996. V. 151. № 2040. P.10 (Великобритания).

#### Палеоклиматология

### Парадоксы палеоклимата

Американские специалисты С.Д'Хондт (S.D'Hondt; Университет штата Род-Айленд) и М.Арчюр (M.Arthur; Университет штата Пенсильвания) определили температуру вод Мирового



океана в конце мелового периода (около 66 млн лет назад). В это время, по общепризнанному мнению, климат планеты был весьма теплым даже в полярных районах.

Температуру исследователи устанавливали по соотношению различных изотопов кислорода, содержащихся в твердой оболочке планктонных организмов, которые, отмирая, погружались на морское дно, а также по концентрации солей в воде.

Если соленость океана была примерно такой же, как ныне, то температура поверхностного слоя тропической его области в меловую эпоху должна была составить 20—21°C (что существенно ниже сегодняшних 27.5°C), причем разность в температурах между полярными регионами и тропическими в среднем не превышала 13°C, тогда как ныне составляет 30°C.

Эти расчеты противоречат теории, согласно которой меловая эпоха в глобальном масштабе отличалась теплым климатом. Чтобы соответствовать современным температурам, Мировой океан должен был иметь соленость Красного моря, что специалисты считают невероятным. Существующие математические модели вполне могут объяснить парниковым эффектом потепление в приполярных областях, но не относительно низкие температуры в тропиках.

Другое исследование, проведенное в 1995 г. Дж.Захосом (J.Zachos; Университет штата Калифорния), показало сходную небольшую разницу температур между полярными и тропическими областями, существовавшую в эпоху эоцена, т.е. примерно 50 млн лет назад. Но при этом

в тропиках тогда было не намного холоднее, чем ныне. Коллега Захоса по университету Л.Цирбус Слоан (L.Cirbus Sloan) считает его результаты важным сигналом для специалистов по моделированию климата, которым теперь необходимо пересмотреть свои подходы. Не исключено, что причиной парадоксального состояния палеоклимата были изменения в глобальном облачном покрове, а также в процессах теплообмена между океаном и атмосферой в тропической зоне планеты.

Science. 1996. J.271. № 5257. P.1838 (США).

#### Палеогеография

### Тяжелые металлы в атмосфере прошлого

С.Хон (S.Hong; Домэнский университет, Сент-Мартен д'Эр, Франция) и его коллеги проанализировали химический состав льда из буровых колонок Гренландии. Как известно, осадки, образовавшие эти слои льда, отражают состав земной атмосферы соответствующего времени. Исследованные в данном случае образцы льда относились к периоду, отстоящему от нас на 7 тыс. лет.

Как выяснилось, впервые осадки стали обнаруживать заметные признаки загрязнения медью около 2500 лет назад, что неудивительно: на это время приходится расцвет древней Греции, где широко практиковалась выплавка меди для изготовления бронзового оружия, монет и различных бранных трудов. Своего максимума концентрация меди

в гренландском льде достигла во времена Римской империи; в средние века она существенно снизилась, а затем снова значительно поднялась в годы промышленной революции XIX в.

Археологические и исторические свидетельства динамики добычи и выплавки меди в различных регионах Европы и Азии хорошо совпали с результатами анализа гренландского льда.

Геохимик-эколог Дж.О.Нриагу (J.O.Nriagu; Университет штата Мичиган, Анн-Арбор, США) подчеркивает, что загрязнение воздушной среды человеческой деятельностью — проблема не только нашего века.

Ранее Хон со своим коллегой К.Ф.Бутроном (C.F.Boutron) аналогичное исследование выполнил относительно свинца, подтвердившее, что в античный период свинцовые выбросы тоже достигали Северной Европы и Гренландии.

Т.Хинкли (T.Hinkley; Геологическая служба США в Денвере, штат Колорадо) установил, что и во льдах Антарктики есть свидетельства работы плавильных устройств, сооруженных 4 тыс. лет назад. Но поскольку Гренландия лежит ближе к очагам древней металлургии, арктические ледники — более точный «инструмент» для изучения динамики промышленной деятельности человека и соответствующего загрязнения естественной среды.

Из дошедших до нас древнеримских источников известно, что и в ту пору иногда вводился запрет на добычу полезных ископаемых и их переработку из-за опасности ядовитых испарений: примитивная технология выплавки металла сопровождалась выделением больших объемов побочных продуктов производства.

Подобные исследования интересны не только метеорологам, климатологам и экологам, но также археологам и историкам, ибо позволяют внести и в эти науки количественные характеристики, в частности определить, когда и в каком масштабе те или иные цивилизации вступили в эпоху металлургии.

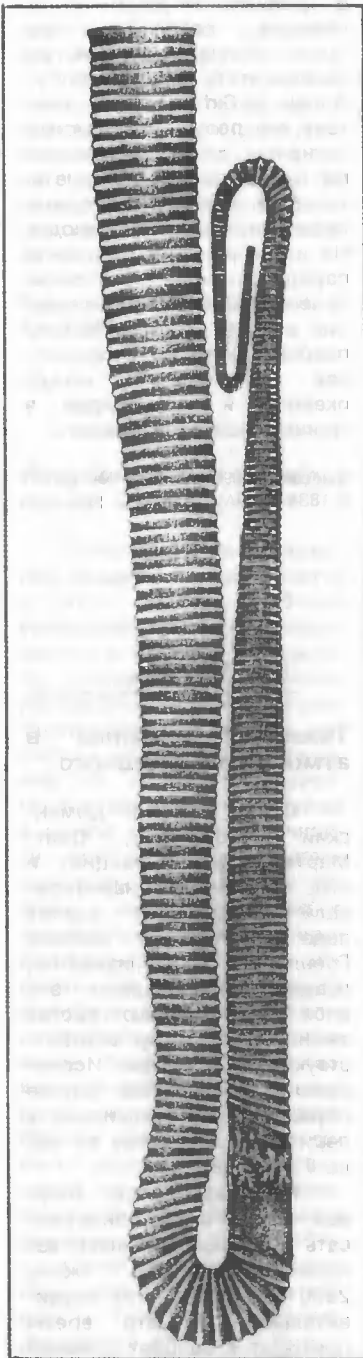
Science. 1996. V.272. № 5259. P.223 (США).

#### Палеонтология

### Находки на острове Сеймур

У западного побережья Антарктического п-ова, в море Уэдделла, лежит о.Сеймур. Среди палеонтологов это безлюдное место, едва свободное от вечного снежного покрова, известно богатством ископаемой флоры и фауны. Около 800 видов животных (остатки которых попали в руки специалистов) населяли этот район на протяжении более 40 млн лет — от позднемиоценового периода до эоцена. На о.Сеймур впервые были обнаружены также остатки антарктического мамонта и древнейшего из пингвинов.

Недавно палеонтолог У.Цинсмейстер и его аспирант А.Олейник (W.Zinsmeister, A.Oleinik; Университет Пардью, Уэст-Лафайет, штат Индиана, США) открыли здесь ископаемые остатки моллюсков аммонитов (*Diplomoceros taxitum*). Это дальний родственник современного нам наутилуса, однако вымер он еще 65 млн лет назад. Внешне диплоцерос напоминает



**Реконструкция *Diplomoceros taxitum*, выполненная А. Олейником. (Ошибочно этот рисунок был помещен в № 5 за этот год на с. 114.)**

кольчатый резиновый шланг; если бы его можно было разогнуть и растянуть, то он бы достиг 4 м в длину! Столь хорошо сохранившегося диплоцероса наука еще не знала.

Собственно тело «червяка» занимало меньше половины его раковины, остальная часть была занята отделенными друг от друга годовыми камерами, соединенными между собой тонкой трубкой-сифоном. Моллюск мог изменять давление газа в этих камерах, посредством чего регулировал свою плавучесть, как это делается на батискафах и подводных лодках.

Дипломцерос принадлежит к группе аммонитов, именуемых гетероморфами. В отличие от своих сородичей, имевших обтекаемую форму тела, представители этой группы обладали самыми странными очертаниями. Полагали даже, что неуклюжие гетероморфы могли жить только в изолированных акваториях океана, где у них не было «конкурентов». Теперь очевидно, что они встречались почти повсеместно в течение миллионов лет мезозойской эры.

Поблизости от диплоцероса был найден череп ископаемого мезозавра длиной 1 м с зубами, достигающими 7,5 см в высоту. Для этих огромных морских ящериц мелового периода, родственных современному «дракону» с о.Комодо (Индонезия), диплоцерос был привычной добычей.

Продолжая раскопки, Цинсмейстер с коллегами вскрыл целый пласт окаменелых костей, принадлежавших разнообразным видам рыб. Пласт лежит на границе между меловым и третичным периодами. Гипотеза, предложенная несколько лет назад американским

геохимиком Л.Альваресом, предполагает, что как раз в это время (65 млн лет назад) Земля столкнулась с крупным астероидом, что привело к вымиранию динозавров и многих их современников. Однако высказываются и другие предположения: столкновение с небесным телом не вызвало немедленного повсеместного исчезновения фауны; этот процесс мог растянуться на 500 тыс. лет. Более того, исследователи отмечают сокращение разнообразия организмов, начавшееся еще за 8—10 млн лет до этого события. Вполне возможно совпадение таких явлений, как резкое изменение климата и усиление вулканической активности в глобальных масштабах, лишь усугубившиеся астрономической катастрофой.

В ходе той же экспедиции удача пришла к палеонтологам еще раз: в песчаных отложениях острова были найдены остатки глиптодона величиной с небольшую автомашину. Это «бронированное» растительноядное животное («родственник» нынешних броненосцев) населяло о.Сеймур в эоцене (40—45 млн лет назад). Костные остатки ископаемых глиптодонов ранее уже находили в Северной и Южной Америке и никогда — так близко к южнополярному кругу.

Раскопки на о.Сеймур продолжаются.

## Палеогеография

### По тундре из Азии в Америку

Общепризнано, что Америку первыми открыли безвестные азиатские охотники, перешедшие туда по Берингийской суше в период последнего оледенения, скорее всего во время небольшого потепления (межстадиала), 40—32 тыс. лет назад<sup>1</sup>. Но какая была там природная обстановка?

Основываясь на находках больших количества пыльцы полярники на Аляске, полагали, что Берингия была покрыта в то время степью или, по крайней мере, тундростепью, подобной той, что сейчас можно встретить лишь в южной Сибири. Ведь в тундре полярники не растут. Специалисты до сих пор спорят<sup>2</sup>, что такое тундростепь: миф или реальность прошлого? Лишь в самые последние годы американские и норвежские исследователи получили четкий и однозначный ответ: Берингия была тундрой.

Специалисты из Колорадского университета, Геологической службы США в Менло-Парке и Бергенского университета<sup>3</sup> исследовали 20 колонок грунта, взятых со дна Чукотского и Берингова морей (на глубине 8—48 м), вблизи берегов Аляски — от мыса Ледяного до о.Св.Лаврентия. Длина колонок 0.4—4.6 м, возраст

самых древних слоев — от 3.45 тыс. лет и почти до 50 тыс. лет. Основная толща сложена торфом с органическими остатками, и лишь самые верхние слои — морские отложения голоценового возраста. В колонках идентифицированы пыльца, остатки растений и насекомых (жуков).

Установлено, что Берингов пролив открылся только 11 тыс. лет назад. Через 500 лет уровень океана был еще на 40 м ниже современного, но большая часть Чукотского моря уже существовала и водообмен между Тихим и Северным Ледовитым океанами шел не только через Берингов, но и через впоследствии закрывшийся Анадырский пролив шириной 30 км. Еще через 1000 лет уровень океана поднялся до уровня —30 м от современного, п-ов Св.Лаврентия стал островом и тихоокеанское течение усилилось. Но только 5 тыс. лет назад море достигло нынешней береговой линии.

Более 40 тыс. лет назад Берингия представляла собой умеренно влажную березово-вересково-травянистую тундру с ивняками, озерцами, заросшими рогозом, рдестом и урутью, со сфагновыми болотами, почти без элементов степной растительности. В период максимума последнего оледенения, 20—14 тыс. лет назад, она была березово-травянистой, по-прежнему с небольшими озерами и болотами с водной растительностью, однако в целом — более сухой, чем ранее. Насекомые были типичны для суровой арктической тундры. В конце же оледенения, 14—11 тыс. лет назад, растительность и энтомофауна вновь, как и более 40 тыс. лет назад, стали типичными для уме-

<sup>1</sup> Несис К.Н. Когда человек заселил Америку? // Природа. 1988. № 2. С.120—121.

<sup>2</sup> Кожевников Ю.П., Железнов-Чукотский Н.К. Берингия: история и эволюция. М., 1995.

<sup>3</sup> Elias S.A., Short S.K., Nelson C.H., Birks H.H. // Nature. 1996. V.382. № 6586. P.60—63; Colinvaux P. Ibid. P.21, 23.

ренно влажной тундры с озерами, осоковыми и сфагновыми болотами. Никаких степей или лесов там не существовало. Сухие места преобладали только в нагорьях.

Климат в период максимума оледенения характеризовался крайне малым количеством осадков и преимущественно безоблачным небом, лето было коротким, зима — очень долгой и суровой. Только 12 тыс. лет назад летняя температура стала такой же, как сейчас, а 11.5—11 тыс. лет назад она была выше, чем теперь: в среднем 11.5—13°C. Зимняя же температура даже тогда была градусов на восемь ниже, чем ныне на аляскинском побережье Берингова пролива (от -28.5 до -23.5°C). В центре моста суши климат был суровее и более континентальным, чем на побережьях. На берегу Чукотского моря в конце оледенения летняя температура была на 5—6° выше, а зимняя — на 5° ниже, чем теперь на мысе Барроу, в самой северной точке Аляски (соответственно 9.25—10.25°C и от -32.25 до -27.75°C). Поднятие уровня моря до современного со- впадало по времени с максимальным послеледниковым потеплением.

Новые данные заставляют пересмотреть условия существования первобытных охотников Берингии. Сухие степи или тундростепи могли прокормить громадные стада мамонтов, диких лошадей, бизонов, туров, сайгаков и других животных, тундра же гораздо менее продуктивна. Зато гоняться за стадами копытных по бескрайней сухой степи несравненно труднее, чем по тундре, где можно направить животных на узкий перешеек между озерами

или болотами и где их уже поджидает засада охотников с луками и копьями. Устраивая засады в узких проходах между озерами и болотами, человек мог уверенно побеждать львов, леопардов, гиен и волков — своих конкурентов в борьбе за диких копытных, не говоря уж о мало каким хищникам доступных мамонтах.

© К.Н.Несис,  
доктор биологических наук  
Москва

#### Археология

### 20 тысяч лет назад в Канаде жили люди

Сотрудники факультета геологии Университета провинции Альберта (Канада) опубликовали результаты исследований, проведенных в 1990—1994 гг. на окраине города Калгари, в долине р.Боу, у подножия Скалистых гор<sup>1</sup>. В обнажении речной террасы ими обнаружены непереотложенные (*in situ*) каменные орудия, перекрытые слоями донных осадков древнего озера. Оно образовалось после того, как 25—20 тыс. лет назад наступавший к югу Лаврентийский ледниковый щит перекрыл русло реки и воспрепятствовал стоку вод в восточном направлении. Толщина осадков 24 м. Неподалеку, в слое нижележащего гравия, найдены каменные орудия несколько более раннего времени. Из-за отсутствия органических материалов прямое датирование находок радиоуглеродным методом осуществить не удалось, однако

отнесение их к периоду, предшествовавшему максимуму последнего, висконсинского похолодания, сомнений как будто не вызывает.

Орудия сделаны из местных пород камня, в основном из кварцита. Некоторые гальки со сколами, найденные в слое гравия, настолько невыразительны, что могут иметь и естественное происхождение. Однако другие предметы, в том числе вся индустрия верхнего, залегающего под озерными отложениями, комплекса (скребла, резцы, бифасы и пр.), безусловно, — продукт деятельности человека. В целом орудия напоминают те, которые 30—20 тыс. лет назад делали обитатели юга российского Дальнего Востока, Кореи, Японии, пустыни Гоби. Более точные аналогии пока указать трудно.

Заявления об открытии в Новом Свете изделий, относящихся к периоду ранее 12—13 тыс. лет назад, делались неоднократно, но каждый раз отвергались как явно ложные или недоказуемые. В то же время специалисты по популяционной генетике полагают, что 10—15 тыс. лет — слишком малый срок, чтобы объяснить генетическое разнообразие, наблюдаемое среди американских аборигенов. Исследования в Калгари, видимо, заставят пересмотреть вероятный сценарий расселения человека в Западном полушарии в пользу не одной, а нескольких миграционных волн. На северо-востоке Сибири археологические памятники, сопоставимые по возрасту с находками в Калгари, пока не обнаружены.

© Ю.Е.Березкин,  
кандидат исторических наук  
Санкт-Петербург

<sup>1</sup> Chlachula, Jiri. // L'Anthropologie. 1996. V.100. № 1. P.88—131.

## «Золотая книга», или «Печаль моя светла»

Н. В. Карлов,

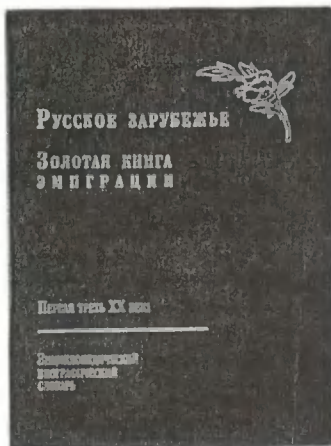
член-корреспондент РАН

**Ч**ЕЛОВЕК заселял Землю миграционно. Все мы — мигранты или потомки мигрантов. Это, кроме всего прочего, с очевидностью вытекает из рассказа Священной истории о праотце Адаме или из парадигмы моноцентризма современных теорий антропогенеза, что, как часто бывает, в этом смысле эквивалентно.

Миграция диффузна, почти равновесна, медленна и, как правило, безболезненна и сущностно нетрагична для мигрирующих. В своих крайних, неравновесных проявлениях, таких как Великое переселение народов, миграция бывает ужасной только для тех, кто стоит на пути потока мигрантов, но не для них самих.

Миграция — это переселение, перемещение. Другое дело — эмиграция. Это, говоря по-русски, — изгнание, выселение, т.е. явление глубоко трагичное как для судеб эмигрантов, так и для той страны, которая этих людей изгоняет. Вместе с тем надо помнить, что эмиграция крайне благоприятна для страны, эмигрантов принимающей.

Обычно эмиграция возникает под действием идеологических причин. Патриарх Авраам вынужден был покинуть Ур Халдейский в результате конфессионального конфликта, когда он познал Единого Бога. Как известно, именно Авраам создал Израиль — народ, религию, государство. Британские диссиденты были вытеснены из Англии. Эмигрировав в Северную Америку, они создали Соединенные Штаты.



РУССКОЕ ЗАРУБЕЖЬЕ. ЗОЛОТАЯ КНИГА ЭМИГРАЦИИ. ПЕРВАЯ ТРЕТЬ XX ВЕКА. Энциклопедический биографический словарь. Под общ. ред. В. В. Шелохаева. М.: РоссПЭН, 1997. 748 с.

Французские гугеноты, изгнанные из страны в результате отмены Нантских эдиктов Генриха IV, обогатили материально и духовно Нидерландские Штаты и создали Южно-Африканскую Республику.

Все они и многие другие, к примеру, наши молокане и духоборы, преодолев невероятные личностные трудности, создали новые процветающие человеческие общности за счет резкого обеднения возможностей развития и снижения потенциала своей исходной страны, своей исторической родины.

Точно таковы же последствия этнически обусловленной эмиграции. Гитлеровское изгнание евреев из Германии существенно обескровило науку этой страны и одновременно резко подняло уровень науки в США. Аналогично,

взятие Константинополя турками-османами (1453) привело к массовому исходу византийцев — православных греков, носителей эллинизма, эмигрировавших в Италию, что и способствовало заметному подъему культуры в ней на изломе XV в.

Идеологическое давление может быть не только конфессиональным или этническим. В эпоху социальных революций оно принимает социальный, сословный, имущественный, даже образовательный характер. Новейшую серию социальных революций открыла Великая французская... Я не знаю, что многочисленные французские революции дали миру в смысле носителей нового знания и умения. Мы же в России в дополнение к учителям изящных манер типа «француз убогий, чтоб не измучилось дитя, учил его всему шутя» получили Дюка Ришелье, испанцев Дерибаса и Бетанкура и... Дантеса. Дело в том, что великие французские ученые предреволюционной эпохи — математики, астрономы, механики, физики, химики — приняли революцию, работали на нее и были казнены в пароксизме якобинской диктатуры, ибо «республике ученые не нужны», как сказал судья, отпавший на гильотину Лавуазье. А еще Байи, Кондорсе, Мальзерб, Сарон... Только термидор остановил эту пляску смерти. Четырнадцатимесячный кошмар кончился. Оставшиеся в живых (Бертолле, Кулон, Лагранж, Лаплас, Монж...) продолжали служить Франции и Человечеству. Но эмиграции из Франции, приведшей к утечке умов, бегству

ученых из нее, не случилось.

Иное дело наша революция. Она была столь же закономерна и столь же естественна, как ее французская предшественница. Но время настало уже другое, другим оказался и масштаб событий. Кроме того, позади был хорошо изученный многими опыт французских революций. Результат — двухмиллионная эмиграция, в своем потоке унесшая из России и людей, составлявших цвет нации.

Недавно одно из московских издательств (РоссПЭН) выпустило тиражом 6000 экз. объемный энциклопедический биографический словарь «Золотая книга эмиграции. Первая треть XX в.»<sup>1</sup>. Книга прекрасно издана, богато иллюстрирована, полиграфически совершенна. Но главное не в этом, главное в том, что эта книга — явление в нашей культурной жизни.

Массовый интеллигентный читатель воспитан применительно к эмиграции на романах Алексея Толстого и Булгакова (или их киноверсиях), повестях Бунина, воспоминаниях Игнатъева, стихах Цветаевой, песнях Вертинского и Петра Лещенко. Общедоступные публикации последнего времени многого добавить не смогли, поскольку носят в основной своей массе характер либо чекистски-скандальный, в духе газеты «Совершенно секретно», либо около-литературно-скандальный, в духе воспоминаний Нины Берберовой.

Тем не менее мы здесь, в России, знали о неоченимом вкладе в сокровищницу мировой культуры, вносимом нашими соотечественниками за рубежом. Знали их имена и гордились ими. Нам всегда было ясно, что дети России и

вдали от Родины, и в изгнании сохраняют, развивают и приумножают вековые традиции русской культуры.

Своеобразие России, особенности русского национального самосознания, обусловленные, видимо, ее историей, да и географией тоже (т.е. обусловленные геополитически), заключаются, в частности, в том, что, находясь в изгнании, русские люди плохо ассимилируются. Поведенчески, культурологически они очень долго остаются русскими.

Такова душа (или менталитет) русского человека. Прежде всего сказанное относится к людям гуманитарного строя — писателям, поэтам, философам, художникам, музыкантам, деятелям церкви. Они к тому же по природе своей более экстравертны. Поэтому мы, как и мир в целом, и страна пребывания, знаем о них больше всего, поэтому именно по ним судим мы об эмиграции как о явлении.

Открытие, которое ожидает читателей рассматриваемой книги, — биографии русских людей науки и техники, оказавшихся в изгнании, людей, прекрасно вписавшихся в западный мир точного знания и инженерного искусства, успешно освоивших западный способ жизни. Потеря таких людей Россией вчуже обидна. А их было много.

Из 420 биографий, приведенных в книге, 81 посвящена инженерам и людям науки. Применительно к задаче этого моего рассказа под наукой я понимаю естествознание и математику, отличая их тем самым от того, что у нас принято вежливо именовать гуманитарными и (или) общественными науками.

Обращает на себя внимание то весьма похвальное обстоятельство, что состави-

тели не ограничились именами-символами, не ограничились именами гигантов, таких как Гамов, Зворыкин, Ипатьев, Сикорский, Тимошенко, Чичибабин, Эйхенвальд. Эти люди составляют славу мировой науки, но именно поэтому их всегда мало. Их роль трудно переоценить, однако не только их трудами формируется поток технического и научного прогресса.

Персонажи энциклопедии оказались довольно равномерно распределенными по видам научно-технической деятельности: математика — 12 человек, физика и астрономия — 12, инженерия, в том числе горная, — 12, химия — 12, биология и физиология — 14. Выделяется авиация — 17 человек. Это не случайно. В первой половине нашего века именно авиация была вершиной инженерного искусства, именно авиация привлекала к себе наиболее активных, творчески одаренных, инициативных людей. Неудивительно, что наши соотечественники оказались среди таковых.

Для меня явились откровением имена А.М.Никольского — конструктора геликоптеров, исследователя динамики устойчивости вертолетных аппаратов и А.С.Прокофьева-Северского — конструктора многих машин, принятых в серийное производство, человека, награжденного в 1946 г. медалью «За заслуги» — самой почетной наградой США, присуждаемой гражданским лицам.

Все имена назвать невозможно. Да, пожалуй, и не нужно. На русском кладбище в Сен-Женевьев-де-Буа под Парижем над одной из братских могил стоит памятный камень с вечно мудрой и такой русской надписью: «А имена их Ты, Господи, веши».

Рецензируемая книга открывает часть этих имен и нам, грешным.

<sup>1</sup> Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (РГНФ).

## Переменчивая судьба Зигмунда Врублевского

**В. А. Волков,**

кандидат исторических наук

Институт истории естествознания и техники им.С.И.Вавилова РАН  
Москва

### ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

**И**МЯ польского физика Зигмунда Флорентия Врублевского (1845—1888) прочно вошло в историко-научные обзоры и учебники. Главные его исследования посвящены диффузии газов в твердых и жидких телах и проблеме оживления газов. В 1883 г. он вместе с К.С.Ольшевским впервые получил жидкий кислород. Они также добились оживления азота и раньше других близко подошли к оживлению водорода. Увы, им не удалось перейти этот важный рубеж на пути к низким температурам. Первым оживил водород М.Дьюар (кстати, теплоизолированный сосуд «дьюар» — от его имени). Любопытно интерпретировал эту ситуацию П.Л.Капица. «Если бы у Ольшевского и Врублевского были такие же средства, как у Дьюара, — рассказывал Петр Леонидович студентам Физтеха, — они бы раньше его оживили водород, потому что, читая их работы, видишь, что и анализ, подход, и самый стиль работы, нужно отдать им справедливость, были более элегантны, более интересны, чем у Дьюара»<sup>1</sup>.



*Зигмунд Флорентий Врублевский в последние годы жизни.*

На долю Врублевского выпала переменчивая, полная резких поворотов судьба. Уроженец города Гродно, он с 1862 г. начал учиться в Киевском университете им.Св.Владимира, однако через год за участие в Польском восстании был сослан в Сибирь. В родные края он вернулся лишь в 1869 г., с подорванным здоровьем, почти слепой. Долго лечился, но после этого смог продолжить обучение в Гейдельбергском и Берлинском университетах, затем в Мюнхенском, где в 1874 г. получил степень доктора философии. Работал в Страсбургском университете и в Высшей нормальной школе в Париже, а

с 1882 г. — в Ягеллонском университете в Кракове. Состоял членом Польской академии наук.

Впрочем, веки переменчивой жизни Врублевского и обстоятельства трагической гибели (он опрокинул на себя в лаборатории керосиновую лампу) хорошо известны его биографам. Однако работая в Российском государственном историческом архиве (Санкт-Петербург), я неожиданно обнаружил документ, о существовании которого вряд ли кто-либо подозревал<sup>2</sup>. Это — письмо Врублевского, написанное им в ссылке и посланное Д.А.Толстому, оберпрокурору Синода и одновременно министру народного просвещения. Сразу оговоримся, что наивная лесть Врублевского в адрес будущего шефа жандармов и расчет на возможность вызвать в нем сочувствие к своей судьбе изблещают в молодом Врублевском человека явно идеалистического склада.

Но главное в письме не это. Гораздо более примечательно то, как рано и как сильно проявилась во Врублевском его основная доминанта — тяга к научному познанию и научному творчеству. К счастью, это в

© В.А.Волков

<sup>1</sup> Цит. по: Диатроптов Д.Б. Лекции Капицы // Природа. 1996. № 10. С.91.

<sup>2</sup> РГИА. Ф.703. Оп.93. Д.352. Л.11—12 об.

итоге нашло-таки воплощение в его научной карьере. Однако прежде чем выйти, так сказать, на финишную прямую, ему посчастливилось преодолеть не только тяготы ссылки и ее последствия, но и некое научное заблуждение — из рода тех, которые иногда укореняются в умах ученых, вынужденных проводить долгие годы в изоляции от научного мира. Пример тому — шлиссельбургец Н.А.Морозов с его глобальным опровержением исторической хронологии. Но Врублевский был молод, и в нем возобладало здоровое духовное начало. Об этом мы кратко скажем в послесловии к архивному тексту.

Перед публикацией письма — несколько слов о ситуации, связанной с его появлением.

После ареста Врублевский около 16 месяцев просидел в тюрьмах Гродно и Вильно, затем был по этапу отправлен в Томск, где пробыл четыре года, после чего в результате стараний и хлопот родителей был переведен в Цивильск, уездный город Казанской губернии. Жизнь в Цивильске оказалась для Врублевского гораздо тяжелей, чем в Томске. Но обратимся к документу.

#### НЕИЗВЕСТНОЕ ПИСЬМО МИНИСТРУ ПРОСВЕЩЕНИЯ

3/15/февраля 1868 г.

Город Цивильск

*Ваше сиятельство*  
Дмитрий Андреевич,

Прошу извинить смелость, с какой обращаюсь к

Вашему сиятельству. Высокое покровительство, оказанное Вами науке, и глубокое сочувствие ко всему споспешствующему ее развитию в России побуждают меня сообщить об исследовании, которое, надеюсь, будет удостоено Вашего внимания.

Но прежде я должен сказать несколько слов о себе.

Кончивши первым учеником курс наук в Гродненской гимназии в 1862 г. и будучи удостоенным медали, права на чин и аттестата, я поступил в том же году в Киевский университет на физико-математический факультет по разряду математических наук. К сожалению, события 1863 года отвлекли меня от занятий. Имея только 17 лет я поддался господствовавшему тогда между университетским юношеством увлечению, оставил университет, возвратился в Гродно и, скомпрометировавши себя, подвергся аресту. Долгое заключение и уединение от влияния окружающей среды позволяли иначе взглянуть на вещи. Я сознался в своей виновности и чистосердечно раскаялся, что, принимая во внимание, генерал Муравьев<sup>3</sup> приговорил меня, по ограничении прав состояния, выслать на жительство в Томскую губернию.

Прибывши в половине 1865 года в Томск, я видел

ясно, что моя жизнь совершенно парализована. Одна только дорога оставалась, чтобы употребить в пользу свои силы, — наука. Покончивши со всеми мечтами, я принялся с жаром за свое образование, после слишком двухлетнего безделья. Приобретенные сведения оказались растраченными, ни одного языка я не знал. В продолжении пяти месяцев, без помощи учителя, я изучил французский язык, что стал свободно читать на нем сочинения лучших писателей по всем отраслям науки. Впоследствии я изучил и немецкий. Но энциклопедическое, поверхностное знание меня не удовлетворяло. Сознывая свои способности, я решился специализировать занятия и, чтобы выработать метод исследования, основательно изучил «Cours de philosophie positive» Конта. Отраслью, избранною мною, была динамическая физика. Между тем, воспользовавшись Высочайшей милостью, дарованной 16 апреля 1866 г., я переехал на жительство в Казанскую губернию в июне 1867 г., имея в виду дальнейшее свое образование.

Прибывши по распоряжению начальства в Цивильск, я стал изучать динамическую физику по сочинениям лучших европейских ученых. Осмеливаюсь утверждать, что мне удалось опередить гг.Грове, Гельмгольца, Томсона, Тиндаля.

Динамическая теория теплоты, в связи с теорией соотношения сил, произвела переворот во всех наших

<sup>3</sup> М.Н.Муравьев — во время польского восстания 1863—1864 гг. генерал-губернатор Северо-Западного края с чрезвычайными полномочиями; за жестокость прозван «вешателем».



взглядах. Но учение «о силе» разработано еще только в частностях. В то время, когда было доказано, что ни малейшее количество силы не может быть потеряно, оставалось решить вопрос: «Какую форму принимает сила, теряемая всеми мирами в виде света и теплоты, лучейиспускаемых в междузвездное пространство, в чем обнаруживается ее действие?». Этот вопрос был предложен ученой Европе 22 августа 1866 г. при открытии заседаний Британской Ассоциации, президентом ее, Грове. Привожу его заключительные слова: «Мы пока еще не в состоянии решить этих вопросов, но я не знаю ни одной задачи небесной динамики, которая имела бы более глубокий интерес, и мы, быть может, также близки к ее решению, как были предшественники Ньютона к разъяснению огромных динамических отношений материи, указанных этим могущественным гением».

Предсказание знаменитого физика исполнилось. Честь решения этой задачи, льщу себя надеждой, выпала на мою долю. Мне удалось открыть законы развития силы, сделать несколько весьма важных обобщений, бросающих новый взгляд на все учение, и ответить на предложенные выше вопросы. Это дало мне ключ к решению многих космических вопросов, вследствие чего небесная динамика получает совершенно другой характер. Мое исследование в общих чертах уже закончено. Я употребил на

него все средства, какими располагал, и дальше уже работать не могу.

Ослепленный содействием, оказанным Вашим сиятельством развитию науки в России, обращаюсь с полным доверием к Вам как представителю Просвещения, умоляя вызвать меня в Петербург. Сочту себя несчастливленным, если Ваше сиятельство удостоит внимания мой труд и дозволит изложить созданную мною теорию Вам лично или ученой комиссии, которую угодно будет назначить Вашему сиятельству.

При сем объявляю торжественно, что между мной и моим прошедшим нет ничего общего, потому что все нити, соединявшие меня с ним, сорваны. Действительная наука, успешность труда и горький опыт служат лучшим ручательством этого. Какие бы ни были предложены условия Правительством, я на все излагаю согласие вперед. Предоставляя в его распоряжение свою жизнь, все свои силы и способности, умоляю взамен этого только о возможности получить высшее математическое образование, о возможности работать дальше над наукой. Прошу принять, Ваше сиятельство, во внимание и то, что, трудясь, я не имел ни малейшей нравственной поддержки, не находя никого, кто бы мог понимать мои мысли, у меня даже не было могучего стимула — надежды на лучшее мое будущее.

Принимая ответственность за верность вышеиз-

ложенного, с полным доверием слагаю как свою будущность, так и будущность созданной мной теории в руки Вашего сиятельства.

Надеюсь, что великодушное Ваше извинит это смелое обращение, вызванное глубоким уважением к великому призванию Представителя Просвещения.

В сем уверяя честь имею пребывать Вашего сиятельства покорнейшим слугою  
Сигизмунд Врублевский

#### КОРОТКОЕ ПОСЛЕСЛОВИЕ

Письмо это имело следующее продолжение. 17 февраля того же года граф Толстой в письме казанскому губернатору писал о том, что не видит необходимости в поездке Врублевского в Петербург, поскольку «труд свой он может отправить на рассмотрение или Академии наук, или, что еще удобнее, в Казанский университет, между профессорами которого есть замечательные ученые, могущие оценить всякие открытия в науках»<sup>4</sup>.

Врублевскому пришлось еще год томиться в ссылке в Цивильске, пока благодаря «высочайшему манифесту» он не получил возможности приехать в Варшаву. Какова же судьба его «космической теории»? Об этом мы узнали из «Журнала Русского физико-химического общества» за 1888 г. «Живя в уединении, вдали от людей, с которы-

<sup>4</sup> РГИА. Ф.733. Оп.93. Д.352. Л.13.

ми можно было бы поговорить о научных вопросах, и читая книги, случайно попавшиеся под руку, — пишет С.Ламанский, — Врублевский легко мог составить себе ошибочные представления о законах природы. Врублевский в бытность свою в России составил новую космическую теорию, с которой ему хотелось познакомить в Германии корифеев науки и выслушать их мнение. С этой целью в августе 1871 г. он прибыл в Гейдельберг и представил проф.Кирхгофу свою записку о новой космической теории. Кирхгоф прочел эту записку и отнесся весьма скептически к Врублевскому, конечно, не предполагая, что из автора этой ошибочной космической теории выработается впоследствии ученый. Еще менее благосклонный прием

встретил Врублевский со стороны проф.Клаузиуса в Бонне. Я живо помню то время, когда Врублевский приходил ко мне, в Гейдельберге, рассказывая свои неудачные посещения Кирхгофа и Клаузиуса, но Врублевский не отчаивался и не терял надежды произвести опыты для того, чтобы доказать верность положений своей космической теории. Проживши все осенние каникулы (с августа до половины октября) в Гейдельберге, Врублевский отправился в Берлин к Гельмгольцу, который в это время только что начал читать физику в Берлинском университете, посоветоваться относительно своей космической теории. Гельмгольц, прочитавши записку Врублевского, отнесся к нему совершенно спокойно, не делал никаких резких

замечаний, посоветовав Врублевскому начать работать в лаборатории, указав ему на ряд опытов, которые должны были разъяснить Врублевскому его заблуждения. Это простое, спокойное, чуждое всяких сколькихнибудь резких замечаний отношение Гельмгольца, которое известно каждому, кто работал в его лаборатории или обращался к нему за советом, повлияло отрезвляющим образом на Врублевского, поставило его на надлежащую дорогу. В это время Врублевский стал заниматься физикой, мало-помалу оставил свою космическую теорию, впоследствии он даже никогда ей не говорил<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Ламанский С. Врублевский С.А. // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва, физ. отд. 1888. Т.20 Вып.6. С.215—220.

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  
В.С.КРЫЛОВА

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.ripenet\infomarg](http://www.ripenet.infomarg)

Подписано в печать 3.07.97.  
Бумага типографская № 1  
Офсетная печать  
Усл. печ. л. 10,32  
Усл. кр.-отт. 67,8 тыс.  
Уч.-изд. л. 15,1  
Заказ 1002

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

## 8<sup>97</sup>



"Баренц, Шпицберген, Арктика" — так называлась международная конференция, прошедшая в 1996 г. в поселке Баренцбург на о. Западный Шпицберген. Она была посвящена 400-летию последней экспедиции выдающегося голландского мореплавателя В. Баренца (1596—1597), во время которой он открыл неизвестный европейцам архипелаг с ледниками и остроконечными вершинами, обозначив его в судовом журнале как Шпицберген (Острые горы). В XX в. принадлежащий Норвегии архипелаг становится настоящей международной лабораторией — на Шпицбергене работали и работают ученые самых разных специальностей. Кроме того, архипелаг — это центр добычи угля и нефти, а также туристическая Мекка для любителей арктической экзотики.

### **БАРЕНЦ, ШПИЦБЕРГЕН, АРКТИКА**

**Корякин В. С. ПО СЛЕДАМ ЭКСПЕДИЦИЙ БАРЕНЦА**

**Зингер Е. М. СТРАНА ГОР И ЛЕДНИКОВ**

**Глазов М. В., Горячкин С. В., Жидков В. Н. МАРШРУТЫ 1996 Г.**

