

# **ПРИРОДА**

**11 03**



**В НОМЕРЕ:****3 ОТ МОНОКРИСТАЛЛОВ  
К НАНОСТРУКТУРАМ**

60 лет Институту кристаллографии  
им. А.В. Шубникова РАН

*Институт кристаллографии был организован в суровые военные годы. Тогда он выполнял заказы на необходимые для фронта материалы, но само его появление знаменовало становление кристаллографии как самостоятельной науки. Усилиями сотрудников института была создана школа структурного анализа в нашей стране. И сегодня здесь успешно продолжают исследования по актуальным направлениям материаловедения.*

**Симонов В.И.**

**Физическими свойствами кристаллов можно управлять (4)**

**Ковальчук М.В., Клечковская В.В.,  
Фейгин Л.А.**

**Молекулярный конструктор  
Ленгмюра—Блоджетт (11)**

**Гиваргизов Е.И.**

**Кристаллические вискеры  
и нанострия (20)**

**Владимиров Ю.А.**

**Зачем нужна белковая  
кристаллография (26)**

**Расцветаева Р.К.**

**Фамильные минералы  
нашего института (35)**

**Калейдоскоп****41**

Новая цель для зонда «Rosetta» (41). Муравьи-вселенцы угрожают крабам (41). Ход слона (41). Пещерное искусство пришло в Интернет (41).

**42 Блехман И.И.**

**Вибрация «изменяет законы  
механики»**

*Под действием едва заметной вибрации верхнее положение маятника становится устойчивым, металлический шар всплывает в песке, жидкость перестает вытекать из отверстия в сосуде, тело движется вверх по наклонной плоскости, мягкая веревка превращается в жесткую балку, ротор вращается без двигателя. Создается иллюзия нарушения законов механики.*

**Научные сообщения****54 Алифанов В.Р., Болотский Ю.Л.**

**Олоротитан — гигантский лебедь  
из Архары**

**56 Саватюгин Л.М., Шевнина Е.В.**

**Северная Земля:  
90 лет после открытия**

*Полузабытый архипелаг, открытие которого в 1913 г. стало самым крупным географическим событием XX в., требует внимания и государственной заботы. Северная Земля ныне могла бы стать научным полигоном для ученых многих стран.*

**66 Сорокина М.Ю.**

**Вернадский глазами царской  
охранки**

**71 Никишин В.П.**

**Необычная организация покровной  
ткани скребней**

*Успешно паразитировать в кишке человека и животных этим гельминтам позволяет своеобразное строение их покровов, образованных единым многоядерным пластом, а не отдельными клетками, как у большинства многоклеточных организмов.*

**Новости науки****79**

«Портрет» Альфы Центавра. **Сурдин В.Г. (79)**. Найден остаток исторической сверхновой (80). У Млечного Пути обнаружилось кольцо (80). Полярные шапки Марса — из водяного льда (81). Полцарства за владение ITER'ом (81). Увидим ли схемы в алмазах? (82). Энергетические перспективы Великобритании (82). Зачем деревья сбрасывают листья на зиму? **Гиляров А.М. (83)**. Телевидение и агрессивность (83). Судьба бизонов зависит от ДНК (84). Как «изнашиваются» Гималаи (84). VII Международный конгресс по истории океанографии. **Короткевич Г.В. (85)**. Взбунтовались недра Индонезии (85). Динамика климата: что ждет Австралию (86). Библейская хронология подтверждается (87).

**Коротко (53)**

**Объявления (96)**

**Рецензии****88 Абрамов Л.С.**

**Географ и геоботаник В.Б. Сочава**

**Зубрева М.Ю.**

**Закрытое дело Кука (90)**

**Новые книги****92****Встречи с забытым****93 Сытин А.К.**

**Ботаник Александр Бунге  
К 200-летию со дня рождения**

## CONTENTS:

### 3 FROM SINGLE CRYSTALS TO NANOSTRUCTURES

The 60th Anniversary of the Shubnikov Institute of Crystallography

*The Institute of Crystallography was founded during the difficult years of World War II. Then it filled the need for new materials for the front, but its coming into being signaled the emergence of crystallography as an independent field of study. It was its staff that created the school of crystal structure analysis in our country. Today this institute continues to make major advances in materials science.*

**Simonov V.I.**

**The Physical Properties of Crystals Can Be Controlled (4)**

**Kovalchuk M.V., Klechkovskaya V.V., and Feigin L.A.**

**The Langmuir–Blodgett Molecular Construction Set (11)**

**Givargizov E.I.**

**Crystalline Whiskers and Nanotips (20)**

**Vladimirov Yu.A.**

**What's the Use of Protein Crystallography (26)**

**Rastsvetaeva R.K.**

**Mineral Names Related to Our Institute (35)**

### Kaleidoscope

#### 41

A New Objective for the Rosetta Probe (41). Crabs Threatened by Newly Introduced Ants (41). The Motion of an Elephant (41). Cave Art Has Reached the Internet (41).

#### 42 Blekhman I.I.

**Vibration Changes the Laws of Mechanics**

*Under the influence of barely noticeable vibration, the upper position of a pendulum becomes stable, a metal ball floats up in the sand, a liquid stops flowing out of a hole in the vessel, a body moves up the inclined plane, a soft rope turns into a rigid beam, and a rotor rotates without a motor. One has the illusion that the laws of mechanics are violated.*

### Scientific Communications

#### 54 Alifanov V.R. and Bolotsky Yu.L.

**Olorotitan – A Giant Swan from Arkhara**

#### 56 Savatyugin L.M. and Shevnina E.V.

**Severnaya Zemlya: 90 Years after Its Discovery**

*This all-but-forgotten archipelago, whose discovery in 1913 became the most important geographic event of the 20th century, requires attention and care from the state. Severnaya Zemlya could now become a research site for scientists from many countries.*

#### 66 Sorokina M.Yu.

**Vernadsky through the Eyes of the Tsarist Secret Police**

#### 71 Nikishin V.P.

**Unusual Organization of the Epidermis of Proboscis Worms**

*These helminths are well adapted to living in the intestines of humans and animals through the unusual structure of their skin, which consists of a single multinuclear layer rather than individual cells as is common in multicellular organisms.*

### Science News

#### 79

A Portrait of Alpha Centauri. **Surdin V.G.** (79). A Remnant of a Historical Supernova Found (80). A Ring Discovered in the Milky Way (80). The Polar Caps on Mars Are Made of Water Ice (81). Sparing no Expense to Possess ITER (81). Will We See Schemes in Diamonds? (82). Energy Prospects in the U.K. (82). Why Trees Shed Their Leaves before the Winter? **Ghilyarov A.M.** (83). Television and Aggressiveness (83). The Fate of Bisons Depends on DNA (84). How the Himalayas Wear out (84). The 7th International Congress on the History of Oceanography. **Korotkevich G.V.** (85). The Earth's Interior beneath Indonesia in Revolt (85). Climate Dynamics: What Is in Store for Australia? (86). Biblical Chronology Confirmed (87).

In Brief (53)

Advertisement (96)

### Book Reviews

#### 88 Abramov L.S.

**Geographer and Geobotanist V.B. Sochava**

**Zubreva M.Yu.**

**The Closed Case of Cook (90)**

### New Books

#### 92

### Encounters with the Forgotten

#### 93 Sytin A.K.

**Botanist Alexander Bunge**

On the 200th Anniversary of His Birth

---

# ОТ МОНОКРИСТАЛЛОВ К НАНОСТРУКТУРАМ

60 лет Институту кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН

В ноябре 1943 г. в составе Академии наук СССР появился новый институт – Институт кристаллографии. Он возник на основе Лаборатории кристаллографии, фактически работавшей в Москве с 1934 г., сначала в Ломоносовском институте геохимии, минералогии и петрографии, а затем ставшей самостоятельной. Решение, принятое в тяжелое военное время, стало признанием важности работ по получению кристаллов, которые вели сотрудники. Тогда они не только налаживали выпуск необходимых для фронтовых нужд материалов (например, кварцевых стабилизаторов для раций, пьезоэлектрических элементов, кристаллов сегнетовой соли) на специальных заводах, но и сами стояли у станков. Однако и науку не забывали – продолжали усовершенствовать технологии выращивания кристаллов, исследовать сегнетоэлектрики, развивать теорию симметрии. Вдохновителем всех этих изысканий и их активным участником был первый директор института Алексей Васильевич Шубников.

Именно этот выдающийся ученый, тогда член-корреспондент, а позднее – действительный член Академии наук, привлек в традиционную кристаллографию идеи и методы физики, химии, математики и по сути стал основателем отечественной науки о росте, структуре и свойствах кристаллов. Организуя Лабораторию кристаллографии, он постепенно собрал коллектив талантливых энтузиастов: в него вошли такие известные впоследствии ученые, как структурщик и кристаллохимик, будущий академик Н. В. Белов, минералог Г. Г. Леммлейн, электронографист З. Г. Пинскер, кристаллографы М. П. Шаскольская, Е. В. Цинзерлинг и Е. Е. Флинт, ростовики Л. М. Беляев и Н. Н. Шефтал, физик М. В. Классен-Неклюдова, оптик Н. Е. Веденеева. После войны его пополнило новое поколение: Б. К. Вайнштейн, позднее – академик и директор института в 1962–1996 гг., Л. А. Шувалов, И. С. Желудев, В. И. Симонов, Б. Н. Гречушников, В. Л. Инденбом, Д. М. Хейкер, будущие член-корреспонденты РАН Н. А. Киселев, А. А. Чернов, Х. С. Багдасаров, С. М. Стишов. Благодаря трудам сотрудников института в нашей стране была создана школа структурного анализа (в котором с помощью дифракции рентгеновского излучения, нейтронов и электронов определяется атомное строение вещества). На протяжении десятилетий институт остается лидером в этой области. Здесь были расшифрованы тысячи структур – от простых до сложных, включающих и неорганические, и органические, и биологические (в том числе белок).

Но структурными исследованиями работы института никогда не ограничивались. Краеугольным камнем в научной идеологии его сотрудников всегда оставался принцип комплексного подхода: искались закономерности во всей цепочке получение–структура–свойства материалов. С самых первых лет велись активные работы по выращиванию кристаллов, изучению механических, электрических, оптических свойств, установлению их связей со структурой, а структуры – с условиями роста. Накапливаемые знания становились базой для целенаправленного синтеза новых материалов с желаемыми свойствами (так, именно здесь были выращены первые в стране лазерные кристаллы). Со временем в поле зрения ученых попали тонкие пленки, поверхность кристаллов и пленок, границы раздела. И сейчас институт находится на передовых рубежах – активно участвует в разработках для наноэлектроники, причем не только неорганической. Уникальный опыт работы с биологическими объектами позволяет реализовать междисциплинарный подход к технологии будущего. Продолжают развиваться новые методы исследований, прежде всего с использованием синхротронного излучения: директор института член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук – один из инициаторов создания специализированного синхротронного источника и руководитель соответствующего центра Курчатовского института.

О научных достижениях сотрудников института, о перспективных направлениях работ расскажут статьи в этом и следующих номерах журнала.

# Физическими свойствами кристаллов можно управлять

В.И.Симонов

**К**ристаллы — это преобразователи одного вида энергии в другой, созданные самой природой. Если механически сжать пьезокристалл, на его поверхности появится электрический заряд. Если воздействовать на такой кристалл переменным электрическим полем, кристалл начнет вибрировать, генерируя ультразвук определенной частоты. Освещенный лампой накачки лазерный кристалл становится источником когерентного лазерного луча. Кристаллические материалы с ионной проводимостью лежат в основе миниатюрных источников тока. А если к этому добавить полупроводники, сегнетоэлектрики, магнитные и другие кристаллические материалы с особыми физическими свойствами, то роль, которую играют кристаллы в нашей жизни, станет очевидной. Развиваясь, техника выдвигает новые, все более жесткие требования к их физическим свойствам.

## Как достичь цели

Часто используемый при поиске и синтезе новых кристаллических материалов метод проб и ошибок весьма затратен. Чтобы перейти к целенаправ-



*Валентин Иванович Симонов, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории рентгеноструктурного анализа. Основное направление научных исследований — прецизионный структурный анализ кристаллических материалов и установление на этой основе связей между атомным строением и физическими свойствами кристаллов, изучение на атомном уровне механизмов фазовых переходов в кристаллах. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии РАН им.Е.С.Федорова.*

ленному получению новых кристаллов, необходимо знать, как связаны между собой химический состав, атомная структура и физические свойства кристаллов. Центральное место в этой последовательности занимает атомное строение кристаллов, которое расшифровывается методами дифракции рентгеновских лучей, нейтронов или электронов\*.

Кристалл — периодическая трехмерная структура. Современная структурная кристаллография позволяет определять симметрию кристалла (принад-

лежность его к одной из 230 федоровских групп), размеры и форму его элементарной ячейки, координаты базисных атомов структуры и параметры теплового движения атомов с учетом анизотропии и ангармонизма тепловых колебаний. Установить закономерности в ряду состав—структура—свойства можно на основе синтеза, структурных и физических исследований серий кристаллов, отличающихся химическим составом, но кристаллизующихся в одном структурном типе. Изучение таких рядов соединений с изоморфными замещениями позволяет выявить структурную обусловленность интересующих исследователя физических

\* Подробнее о современных методах определения структуры вещества см.: Структурный анализ сегодня // Природа. 1997. №7. С.31—78.

свойств. Существует и иной путь решения задачи. Если в исследуемом кристалле при вариации температуры или наложении гидростатического давления происходят фазовые переходы, то фактически до и после перехода мы имеем кристаллы одного состава, но разного строения с отличающимися физическими свойствами. Сопоставление изменений структурных параметров и физических свойств дает возможность надежно устанавливать соответствующие корреляции.

Понимание связей состав—структура—свойства открывает путь управления физическими характеристиками кристаллов с помощью изоморфных замещений. Области возможного изменения свойств всегда ограничены, но такие вариации могут перекрывать интервалы в несколько порядков величины.

## Носитель тока — ион

Имеются семейства кристаллов, в которых, в отличие от металлов, проводимость обусловлена движением не электронов, а ионов, способных перемещаться по кристаллу благодаря наличию в его структуре каналов. Подобные кристаллы с высокой проводимостью ( $\sigma > 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) относят к суперионным материалам или твердым электролитам. Можно утверждать, что наряду с электроникой развивается ее младшая сестра — ионика твердого тела [1]. Суперионики занимают все более заметное место в физике твердого тела и материаловедении. Так, на основе нестехиометрических фторидов  $M_{1-x}^{+2}R_x^{+3}F_{2+x}^{-1}$  со структурой флюорита  $\text{CaF}_2$  созданы применяемые на химических предприятиях датчики, фиксирующие появление в атмосфере следов фтора. В этих датчиках под действием напряжения источника питания «собственные» ионы фтора собираются у электрода и ток отсутствует; если же

фтор попадает в датчик из окружающей среды, то проводимость восстанавливается. Суперионики позволяют создать конденсаторы гигантской емкости, которая обусловлена атомно-малыми расстояниями между обкладками. Промышленность освоила производства конденсаторов фарадной емкости на их основе. Пальму первенства в практическом использовании, безусловно, держат миниатюрные источники электропитания, в которых суперионики служат основной составляющей. По запасам количества электричества на единицу веса лидируют батарейки и аккумуляторы на основе супериоников с проводимостью по ионам лития. Если вы ставите в электронные ручные часы новую крохотную литиевую батарейку, то на ближайшие два-три года у вас не возникает проблемы с необходимостью ее замены. Миниатюрные источники тока используются на каждом шагу — от детских игрушек до портативных вычислительных машин и мобильных телефонов. По оценкам специалистов, мировая сумма продаж таких источников тока достигает миллиардов долларов США в месяц.

В основе атомной структуры кристаллов с высокой ионной проводимостью обычно лежит прочный и ажурный трехмерный каркас, пронизываемый каналами различной формы и сечения. В таких каналах статистически локализируются ионы, которые под действием электрического поля приходят в движение и транспортируют заряды. В свое время в Институте кристаллографии были синтезированы суперионные соединения с проводимостью по литию нового структурного типа [2] — кристаллы состава  $\text{Li}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$  и  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ . В этих соединениях при разных температурах происходят два фазовых перехода, причем суперионной является высокотемпературная фаза. У выращенных монокристаллов была расшифрована атомная структура (рент-

геновскими и нейтронографическими методами) и установлены проводящие свойства. Ионная проводимость по литию в них при комнатной температуре оказалась равной  $1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а в суперионном состоянии —  $1.8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Модель атомной структуры кристалла  $\text{Li}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$  представлена на рис.1. Трехмерный каркас структуры построен из октаэдров  $[\text{ScO}_6]$  и тетраэдров  $[\text{PO}_4]$ , соединенных через общие кислородные вершины. В каналах этого каркаса располагаются ионы лития. Если симметрия низкотемпературных фаз этих кристаллов моноклиная и характеризуется федоровской группой симметрии  $P2_1/n$ , то при переходе в суперионную фазу каркас структуры симметризуется до ромбического, и структура реализуется в рамках группы симметрии  $P6_{3m}$ . Имеющиеся в элементарной ячейке кристалла 12 ионов лития в суперионной фазе статистически размещаются по трем кристаллографически независимым позициям, суммарная кратность которых равна 24 (иначе говоря, половина из возможных положений не занята). Поскольку литий слабо рассеивает рентгеновские лучи, пришлось перейти к уточнению заселенностей литием своих позиций по нейтронографическим дифракционным данным [3]. Благодаря последним была установлена существенно различная степень заселенности литием своих кристаллографических позиций, что и служит причиной анизотропии проводимости по ионам лития в этих соединениях. Близок по механизму проводимости к ним суперионный проводник по натрию  $\text{Na}_4\text{Ti}(\text{PO}_4)_2\text{O}$ , где электропроводность в суперионной фазе достигает  $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Яркий пример твердых электролитов, в которых ионную проводимость можно путем изоморфных замещений целенаправленно изменять в сотни раз, дают соединения со структурой типа  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)$ . На рис.2 представлена модель такой

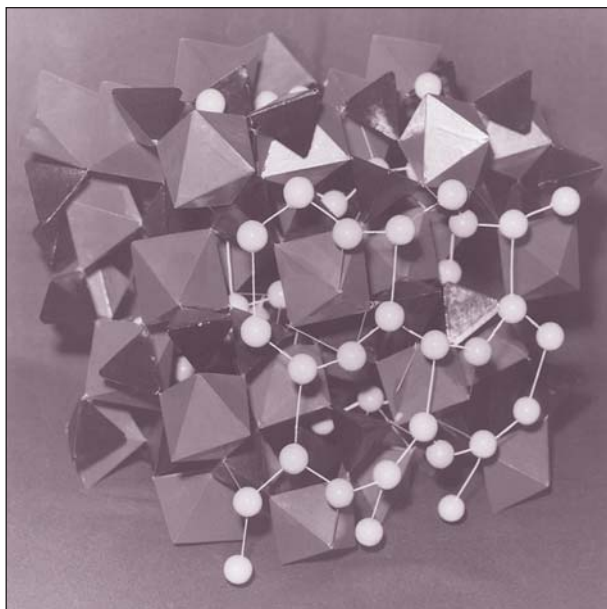


Рис.1. Модель структуры  $\text{Li}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ . Ажурный трехмерный каркас образован  $[\text{ScO}_6]$ -октаэдрами и  $[\text{PO}_4]$ -тетраэдрами. В каналах каркаса размещаются ионы лития (шарики).

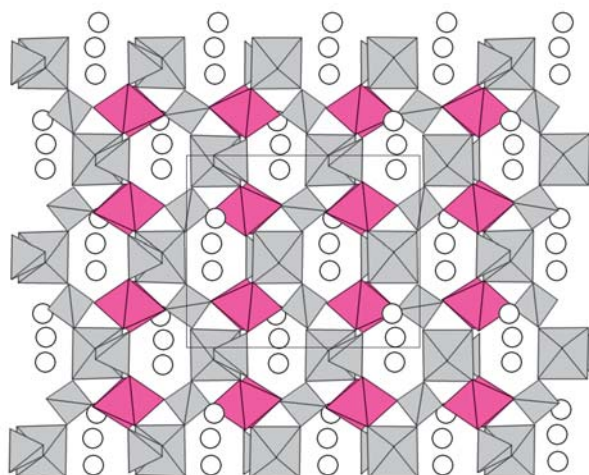


Рис.2. Модель структуры  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)$ . Цепочки из  $[\text{TiO}_6]$ -октаэдров объединены  $[\text{PO}_4]$ -тетраэдрами в каркас. Катионы калия локализуются в каналах каркаса, заселяя свои позиции, показанные светлыми кружками, статистически.

структуры. Каркас построен из  $[\text{TiO}_6]$  октаэдров и  $[\text{PO}_4]$  тетраэдров. В отличие от структуры  $\text{Li}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ , в которой разрозненные октаэдры объединяются в каркас только тетраэдрами, в  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)$  сами октаэдры через общие кислородные вершины объединены в пронизывающие весь кристалл цепочки. Тетраэдры скрепляют эти цепочки уже в трехмерный каркас. В каналах винтообразной формы размещены ионы калия, которые и переносят ток. В этих соединениях калий можно частично или полностью заменить на натрий, таллий, рубидий или цезий. Однако резкое увеличение ионной проводимости достигается иными замещениями. В исходной структуре валентности атомов характеризуются следующими значениями:  $\text{K}^{+1}\text{Ti}^{+4}\text{O}^{-2}(\text{P}^{+5}\text{O}_4^{-2})$ . Как оказалось [4], если четырехвалентный титан частично заменить на пятивалентный ниобий, сохранив количество кислорода, для компенсации избыточной положи-

тельной валентности возникнет соответствующий дефицит ионов калия  $\text{K}_{1-x}^{+1}\text{Ti}_{1-x}^{+4}\text{Nb}_x^{+5}\text{O}^{-2}(\text{P}^{+5}\text{O}_4^{-2})$ . При этом калий в каналах структуры рассредоточивается и занимает свои позиции статистически. Дефектность в заселенностях калием своих позиций обеспечивает возможность его движения по каналам. В твердом растворе, в котором 2 ат.% титана замещены ниобием  $\text{K}_{0.98}\text{Ti}_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}(\text{PO}_4)$ , электропроводность при фазовом переходе в суперионное состояние увеличивается на полтора порядка.

### Световой луч взаимодействует с кристаллом

Лазерная техника, оптоэлектроника и другие разделы прикладного материаловедения нуждаются в кристаллических материалах с особыми оптическими характеристиками. Кристаллы с нелинейными оптиче-

скими свойствами используются для удвоения частоты лазерного излучения, для записи голограмм, для модуляции светового луча и передачи с его помощью огромных объемов информации без искажений на большие расстояния и т.д. Упомянутые выше твердые растворы со структурой  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)$  не только твердые электролиты, но и кристаллы с нелинейными оптическими характеристиками. Кристаллы  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)$  успешно используются для удвоения частоты лазерного излучения иттрий-алюминиевого граната с неодимом  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{+3}$ . При этом излучение с длиной волны  $\lambda=1064$  нм преобразуется в излучение с  $\lambda=532$  нм при эффективности до 85%. Если сравнить интенсивность второй гармоники от кристалла  $\text{KTiOPO}_4$  и от кристалла  $\text{SiO}_2$  при равных условиях, то выигрыш для первого будет примерно в 400 раз.

Ответ на вопрос о том, какие структурные характеристики отвечают за нелинейные свойства,

дают исследования монокристаллов непрерывного ряда твердых растворов в системе  $\text{KTiO}(\text{PO}_4)\text{—KSnO}(\text{PO}_4)$  [5]. Когда степень замещения титана оловом возрастает, нелинейные характеристики материалов ухудшаются и интенсивность излучения второй гармоники падает — в кристалле  $\text{KSnOPO}_4$  она практически отсутствует. Рентгеноструктурные исследования монокристаллов  $\text{KTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{OPO}_4$  с разным соотношением титана и олова позволили установить, что свойство нелинейности коррелирует с асимметрией положения атома катиона в октаэдрах  $[\text{TiO}_6]$ . На рис.2 видны цепочки из Ti-октаэдров, в которых чередуются два кристаллографически независимых атома титана Ti(1) и Ti(2). Анализ межатомных расстояний титан—кислород показал, что одно расстояние Ti—O в каждом из октаэдров укороченное (сильная титанильная связь), напротив сильной связи находится удлиненная (ослабленная) связь, а четыре экваториальных связи Ti—O имеют средние значения. Таким образом вдоль цепочек чередуются укороченные и удлиненные связи. В кристалле  $\text{KTiOPO}_4$  чередующиеся длины связей равны:  $\text{—O—} = 1.716 \text{ \AA} = \text{Ti(1)—} 1.985 \text{ \AA} \text{—O} = 1.736 \text{ \AA} = \text{Ti(2)—} 2.099 \text{ \AA} \text{—O}$ . Разности этих длин  $\Delta(\text{Ti—O})$  в одном и другом октаэдрах соответственно  $0.269 \text{ \AA}$  и  $0.363 \text{ \AA}$ . При изоморфном вхождении олова в титановые октаэдры связи начинают постепенно выравниваться и в кристалле  $\text{KSnOPO}_4$  они становятся  $\text{—O—} 1.978 \text{ \AA} \text{—Sn(1)—} 1.975 \text{ \AA} \text{—O—} 1.961 \text{ \AA} \text{—Sn(2)—} 1.957 \text{ \AA} \text{—O—}$ , а их разности падают до  $0.003 \text{ \AA}$  и  $0.004 \text{ \AA}$ . Такая симметризация связей оказывается губительной для нелинейности, и вторая гармоника излучения от кристаллов со 100% олова практически полностью исчезает. Итак, нелинейные характеристики твердых растворов  $\text{K}(\text{Ti},\text{Sn})\text{OPO}_4$  могут целенаправленно регулироваться путем изменения отношения количества титана и олова в образце.

Еще одно семейство соединений с контролируемыми нелинейными характеристиками — твердые растворы ниобата стронция-бария  $(\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x})\text{Nb}_2\text{O}_6$ . Эти кристаллы не только обладают оптическими нелинейными свойствами, но и являются пьезо- и пироэлектриками. Первое структурное определение монокристаллов состава  $(\text{Sr}_{0.73}\text{Ba}_{0.27})\text{Nb}_2\text{O}_6$  было выполнено еще в 1968 г., но исследования атомного строения таких кристаллов с различным содержанием стронция и бария продолжают и в наши дни. Прецизионные структурные результаты [6] получены для твердых растворов с содержанием в соединениях  $(\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x})\text{Nb}_2\text{O}_6$  стронция  $x=0.33; 0.50; 0.61$  и  $0.75$ . Установлено, что твердые растворы с интересующей нас структурой (обеспечивающей упомянутые свойства) существуют только при содержании стронция в кристаллах в пределах  $0.25 < x < 0.75$ . Из структурных исследований стали ясны причины этих ограничений. Данные твердые растворы кристаллизуются в рамках ацентричной тетрагональной группы симметрии  $P4bm$ . В элементарной ячейке кристалла объемом  $613 \text{ \AA}^3$  содержится пять формульных единиц состава  $(\text{Sr},\text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$ . Атомная модель структуры таких кристаллов представлена на рис.3. Два кристаллографически независимых сорта Nb-октаэдров —  $[\text{Nb}(1)\text{O}_6]$  и  $[\text{Nb}(2)\text{O}_6]$  — образуют каждый свои колонки, простирающиеся параллельно оси  $z$  — четверной оси симметрии кристалла. Октаэдры в колонки объединяют атомы O, каждый из которых с равной вероятностью заселяет одну из двух близко расположенных позиций. Колонки между собой соединены через общие кислородные вершины, занимающие фиксированные положения. Как видно из рисунка, структуру пронизывают сквозные каналы трех сортов. Минимальный диаметр — у каналов треугольного сечения, они всегда пусты.

В средних каналах квадратного сечения локализуется только стронций. Барий размещается в самых широких каналах пятиугольного сечения, там же находится и часть стронция.

Суммарная кратность позиций в каналах двух типов равна шести, а, как сказано выше, атомов  $(\text{Sr},\text{Ba})$  на элементарную ячейку приходится всего пять. Структурные исследования показали, что при любом допустимом соотношении стронция и бария заселенность каналов всегда статистическая, а дефекты в форме вакансий присутствуют в квадратных и пятиугольных каналах. Именно эта дефектность служит причиной релаксорных свойств сегнетоэлектриков  $(\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x})\text{Nb}_2\text{O}_6$ . При изменении количества стронция в кристалле от  $x=0.33$  до  $x=0.75$  позиции с кратностью, равной двум, в квадратных каналах заселяются в пределах

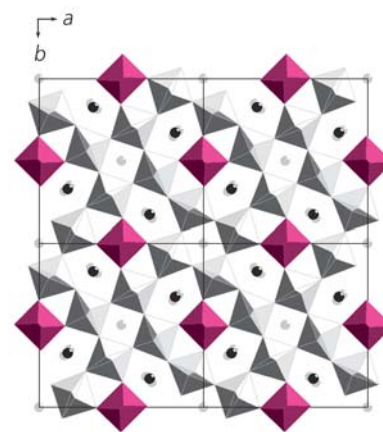


Рис.3. Модель структуры  $(\text{Sr},\text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$ . В каркасе из  $[\text{NbO}_6]$ -октаэдров параллельно оси  $z$  (перпендикулярно плоскости рисунка) идут каналы трех типов. Каналы треугольного сечения пусты. В каналах квадратного сечения статистически размещены стронций. В самых широких каналах пятиугольного сечения статистически локализуется весь барий и частично стронций (эти позиции показаны кружками: темными — для бария и светлыми — для стронция).



70.5—72.5%. Если весь стронций сосредоточен в квадратных каналах, для такой заселенности достаточно его количества на формульную единицу  $x=0.25$ , что и определяет нижнюю границу устойчивости данного типа структур. Остальной стронций размещается в широких каналах статистически, деля позиции с барием. Суммарная заселенность пятиугольных каналов барием и стронцием для всех исследованных структур лежит в пределах 84.0—89.1%. Позиции бария и стронция в этих каналах не совсем совпадают. Расстояние, на которое они пространственно разнесены, зависит от количества стронция. Особенно важно то, что изменение отношения бария и стронция сказывается на асимметрии положения атомов ниобия в своих октаэдрах, — это самым существенным образом влияет на нелинейные оптические характеристики. Как и в цепочках из Ti-октаэдров в кристаллах  $\text{KTiOPO}_4$ , в цепочках из Nb-октаэдров ниобата стронция-бария чередуются короткие сильные и удлиненные слабые связи Nb–O. Разница в длинах этих связей максимальна при минимальном возможном содержании в кристалле стронция. При увеличении количества стронция различие в связях постепенно сокращается, что коррелирует с уменьшением параметра нелинейности соответствующих твердых растворов. В отличие от кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$ , в  $(\text{SrBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$  для регулирования оптических свойств нет нужды вводить в структуру новые легирующие атомы, достаточно варьировать соотношение стронция и бария в образце.

### Старый знакомый — ниобат лития

Ниобат лития  $\text{LiNbO}_3$  — давно известный и широко применяемый в оптике и лазерной технике материал. При первых

же структурных исследованиях в монокристаллах этого соединения было обнаружено существенное отклонение от стехиометрического состава [7] — содержание атомов Li и Nb различалось. Варьирование условий синтеза несколько меняло степень нарушения стехиометрии, но во всех случаях наблюдался избыток ниобия и дефицит лития. Лучшим качеством для оптических применений обладают кристаллы так называемого конгруэнтного состава, когда составы шихты и растущих монокристаллов одинаковы. Такими являются кристаллы, в которых избыток ниобия составляет примерно 1.5 ат.%. Для компенсации разности в валентностях ниобия  $\text{Nb}^{+5}$  и лития  $\text{Li}^{+1}$  недостаток лития при этом достигает 6.0 ат.%. Структура ниобата лития, в основе которой лежит плотнейшая гексагональная упаковка из атомов кислорода, реализуется в пространственной группе симметрии  $R3c$ . Октаэдрические пустоты этой упаковки заселены упорядоченно на  $1/3$  ниобием, на  $1/3$  литием, последняя треть октаэдров остается пустой (рис.4). Авторы работы [7] показали, что избыточный ниобий замещает литий в его позициях и развернутую химическую формулу кристалла следует писать в общем виде  $(\text{Li}_{1-5x}\text{Nb}_x \square_{4x})\text{NbO}_3$  или конкретно  $(\text{Li}_{0.925}\text{Nb}_{0.015} \square_{0.060})\text{NbO}_3$ , где квадратом обозначены вакансии в позициях лития. Для придания устойчивости к мощному лазерному облучению кристаллы ниобата лития легируют такими элементами, как Mg, Zn, In, Sc и др. Сотрудники нашего института при исследовании зависимости оптических характеристик кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  (величины линейного электрооптического эффекта, фотоопрефракции) от количества легирующего цинка обнаружили [8], что они не монотонны: ход зависимостей резко меняется в районах ~1.5 ат.% Zn и ~6.0 ат.% Zn.

Структурная обусловленность такого поведения оптических свойств ниобата лития была установлена также сотрудниками института [9]. Причина оказалась в том, что при увеличении количества цинка дважды (в районах его концентраций 1.5 ат.% и 6.0 ат.%) меняется способ вхождения цинка в кристалл. Сначала при концентрациях до 1.5 ат.% цинк изоморфно замещает избыточный ниобий. Так как валентность цинка два ( $\text{Zn}^{+2}$ ), а ниобия пять ( $\text{Nb}^{+5}$ ), при каждом акте замещения для компенсации разности в валентностях три вакансии заселяются литием (исчезают). При получении кристалла состава  $(\text{Li}_{0.970}\text{Zn}_{0.015} \square_{0.015})\text{NbO}_3$  весь избыточный ниобий оказывается исчерпанным.

Дальнейшее увеличение количества цинка требует иного механизма реализации. Цинк  $\text{Zn}^{+2}$  начинает замещать литий  $\text{Li}^{+1}$  в его позициях. При этом параллельно в кристалле увеличивается число вакансий в пропорции: одна новая вакансия на каждое замещение лития цинком. Этот процесс продолжается до концентрации цинка

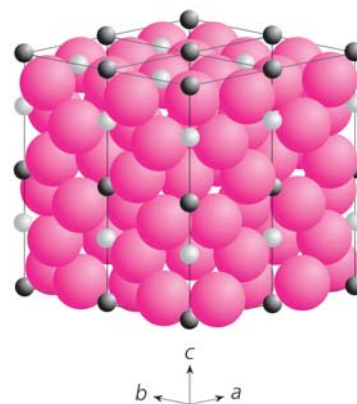


Рис.4. Идеальная структура ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ . Цветные атомы кислорода образуют плотнейшую гексагональную упаковку. Катионы ниобия (темные) и лития (светлые) упорядоченно заселяют октаэдрические полости кислородной упаковки.

в твердом растворе 6.0 ат.% и образования кристаллов состава  $(\text{Li}_{0.88}\text{Zn}_{0.06}\square_{0.06})\text{NbO}_3$ . Продолжить наращивание количества цинка позволяет то, что он вновь вытесняет ниобий, но уже из основных позиций. Здесь, как и на первом этапе, со скоростью 3:1 вакансии заселяются литием и образуются кристаллы типа  $(\text{Li}_{0.91}\text{Zn}_{0.06}\square_{0.03})(\text{Nb}_{0.99}\text{Zn}_{0.01})\text{O}_3$ . Данный механизм естественным образом заканчивается при количестве цинка в кристалле 8 ат.% и образовании соединения состава  $(\text{Li}_{0.94}\text{Zn}_{0.06})(\text{Nb}_{0.98}\text{Zn}_{0.02})$ . В этих кристаллах больше нет вакансий, заселение которых литием могло бы компенсировать дальнейшее гетеровалентное замещение ниобия цинком.

Существование кристаллов с самокомпенсацией было предсказано на основании модельных расчетов. Вырастить кристаллы с несколько большим содержанием цинка, чем 8 ат.%, удастся, но их однородность и оптические свойства существенно ухудшаются. Указанные выше границы концентраций в зависимости от условий выращивания монокристаллов и наличия микропримесей могут несколько смещаться, но способы вхождения цинка в ниобат лития сменяют друг друга в той же последовательности, как было показано прецизионными структурными исследованиями.

## Ультразвук в парателлурите

Кристаллы парателлурита  $\alpha\text{-TeO}_2$  широко применяются в акустооптике. Созданные на их основе линии задержки используют тот факт, что поперечная плоскополяризованная ультразвуковая волна, распространяющаяся в монокристалле по направлениям  $[110]$  или  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , оказывается достаточно медленной. Эти направления отвечают диагоналям основания тетрагональной элементарной ячейки кристалла. Парателлурит кристаллизуется в рамках ацентричной тетрагональной пространственной группы симметрии  $P4_32_12$  с параметрами элементарной ячейки  $a=4.810 \text{ \AA}$ ,  $c=7.613 \text{ \AA}$  (рис.5,а). Внимание специалистов-структурщиков привлекла в этих кристаллах весьма существенная анизотропия поглощения ультразвука [10]. Например, при распространении плоскополяризованной волны частотой в 1 Гц вдоль направления  $[110]$  с колебаниями в волне по направлению  $[\bar{1}\bar{1}0]$  поглощение достигает 290 дБ/см. Стоит кристалл повернуть на  $45^\circ$  вокруг оси симметрии четвертого порядка так, чтобы волна ультразвука пошла вдоль направления  $[100]$  с колебаниями по  $[010]$ , как поглощение падает до 19 дБ/см.

Если же монокристалл опрокинуть и колебания в волне совпадут по направлению с четвертой осью симметрии кристалла, то при любом направлении распространения волны в перпендикулярной этому направлению плоскости  $(001)$  поглощение составит всего 9 дБ/см.

Для установления структурной причины такой резкой зависимости поглощения акустической волны от направления ее распространения были выполнены прецизионные рентгеноструктурные исследования монокристаллов  $\alpha\text{-TeO}_2$ . Окружение атома Te кислородами имеет тип 2+2+2, что означает (рис.5,б): два ближайших атома O отстоят от теллура на расстояниях  $1.880 \text{ \AA}$  (правые), два следующих кислорода удалены на  $2.121 \text{ \AA}$  (средние) и еще два атома O находятся на расстояниях  $2.867 \text{ \AA}$ . Через общие атомы кислорода все группы  $[\text{TeO}_6]$  объединены в трехмерный каркас. При этом каждый атом O связан с тремя атомами Te: от одного теллура кислород находится на близком расстоянии, от второго на среднем и от третьего — на увеличенном расстоянии. Такое распределение химических связей в кристалле обусловлено электронной структурой атомов Te. Потенциалы атом-атомного взаимодействия в кристаллах существенно несимметричны. Для сближения

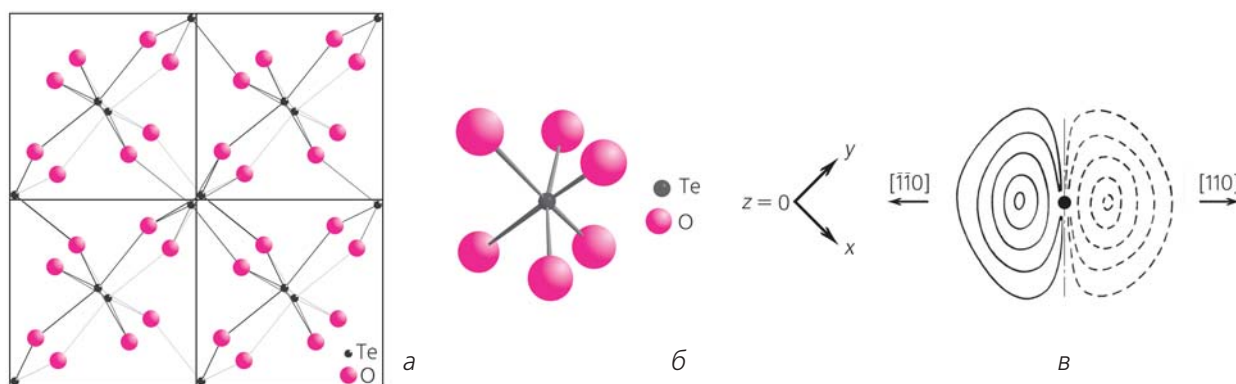


Рис.5. Структура парателлурита  $\alpha\text{-TeO}_2$ . а — Проекция структуры вдоль оси с. б — Ближайшее окружение атома Te атомами O. в — Распределение ангармонической составляющей тепловых колебаний атома Te в плоскости  $(001)$  кристалла. Представлена ангармоническая составляющая плотности вероятности нахождения атома Te в данной точке пространства.

атомов по сравнению с равновесным расстоянием требуется больше усилий, чем для растяжения соответствующей химической связи. В пределе это означает, что нельзя вдавить атом в атом, но вполне реально разорвать химическую связь, скажем, нагреванием до температуры плавления кристаллического образца.

Окружение теллура кислородом, показанное на рис.5,б, существенно влияет на тепловые колебания атомов Те. Короткие (сильные) связи Те–О сжать значительно труднее, чем удлиненные (слабые) связи. В этом причина существенного ангармонизма тепловых колебаний теллура. По сравнению с гармоническими колебаниями атом Те в процессе теплового движения проводит относительно меньше времени, сближаясь с теми атомами О, которые имеют сильные связи с ним. Самое слабое сопротивление атом Те испытывает при сближении с наиболее удаленными кислородными соседями.

Уточнение атомной структуры  $\alpha$ -TeO<sub>2</sub> по рентгеновским дифракционным данным с учетом анизотропии и ангармонизма тепловых колебаний атомов позволило построить для атомов Те ангармоническую составляющую плотности вероятности нахождения в данной точке пространства в процессе теплового движения (рис.5,в). Максимум

распределения смещен от равновесного положения атома Те по направлению  $[\bar{1}\bar{1}0]$ . В обратном направлении фиксируется минимум такого распределения. Разумеется, с учетом гармонической составляющей тепловых колебаний вероятность во всех точках оказывается положительной. Ангармоническая и гармоническая составляющие в направлении  $[110]$  соотносятся как 1:7, в направлении  $[100]$  это отношение становится 1:12, а в направлении  $[001]$  с точностью наших определений тепловые колебания теллура на 100% гармонические.

Таким образом, анизотропия поглощения гармонической ультразвуковой волны коррелирует с распределением в пространстве ангармонической составляющей тепловых колебаний атомов Те. Поглощение акустических волн оказывается минимальным, когда колебания в волне совпадают с направлением  $[001]$ , в котором отсутствует заметный ангармонизм в тепловых колебаниях теллура.

### Несколько заключительных слов

Современные дифракционные методы исследования атомной структуры кристаллических материалов позволяют с высокой точностью фиксировать тонкие детали их строения.

Примененные к рядам изоструктурных соединений с изоморфными замещениями, эти методы дают надежную информацию о структурной обусловленности физических свойств кристаллов. Как показано выше на примерах суперионных кристаллов и кристаллических материалов с нелинейными оптическими характеристиками, такие знания открывают пути целенаправленного регулирования этих свойств методом изоморфных замещений. Понимание связей структура—свойства ведет к принципиально новому эффективному использованию данных, накопленных в постоянно пополняемых банках кристаллографической информации. Если вы знаете структурную обусловленность интересующего вас физического свойства, то банк кристаллографических данных выдаст вам списки кристаллов, обладающих необходимыми структурными характеристиками. Естественно, что именно эти кристаллы будут наиболее перспективными при поиске материалов с заданными свойствами.

Прецизионные структурные исследования важны не только для материаловедения. Физика твердого тела нуждается в такой информации при переходе от феноменологического описания свойств кристаллов и явлений, происходящих в них при внешних воздействиях, к их микроскопической теории. ■

## Литература

1. Иванов-Шиц А.К., Мурин И.В. Ионика твердого тела. СПб., 2000.
2. Демьянец Л.Н., Доронин С.Н., Иванов-Шиц А.К. и др. Твердый электролит: Авторское свидетельство №1190885 на изобретение. 1985 г., 8 июля.
3. Максимов Б.А., Мурадян Л.А., Баданов Н.Н. и др. // Кристаллография. 1991. Т.36. №6. С.1431—1440.
4. Лосевская Т.Ю., Харитоновна Е.П., Воронкова В.И. и др. // Кристаллография. 1999. Т.44. №1. С.95—97.
5. Yanovskii V.K., Voronkova V.I., Losevskaya T.Yu. et al. // Crystallography Reports. 2002. V.47, Suppl.1. P.S99—S104.
6. Черная Т.С., Волк Т.Р., Верин И.А. и др. // Кристаллография. 2002. Т.47. №2. С.249—252.
7. Abrabams S.C., Marsh P. // Acta Cryst. 1986. V.B42. P.61—68.
8. Volk T., Maximov B., Chernaya T. et al. // Appl. Phys. 2001. V.B72. P.647—652.
9. Черная Т.С., Максимов Б.А., Волк Т.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т.73. Вып.2. С.110—113.
10. Кондратюк И.П., Мурадян Л.А., Писаревский Ю.В. и др. // Кристаллография. 1987. Т.32. Вып.3. С.609—617.

# Молекулярный конструктор Ленгмюра—Блоджетт

М.В.Ковальчук, В.В.Клечковская, Л.А.Фейгин

**Ф**изическое материаловедение как область знания возникло в 30-х годах XX в. Техника бурно развивалась (в частности, для разработки новых видов вооружения), и понадобились принципиально новые материалы, в первую очередь специальные стали и сплавы цветных и черных металлов, керамика различного состава. Изучение свойств и строения металлов и сплавов потребовало приложения физических методов исследования и современного математического аппарата. В итоге их синтеза и родилось физическое материаловедение.

Следующий его этап связан с широким внедрением полупроводников, прежде всего монокристаллов кремния и арсенида галлия, в технику. На них держится современная электроника — микроэлектроника, которая определила лицо нынешней цивилизации. А затем возникает принципиально иное — биологическое, или биоорганическое, материаловедение [1], зарождение которого можно наблюдать с 60—70-х годов прошлого века, когда была открыта двойная спираль ДНК, установлены структуры ряда белковых молекул и других биополимеров. Физика проникла в молекулярную биологию посредством рентгеноструктур-



**Михаил Валентинович Ковальчук**, член-корреспондент РАН, директор Института кристаллографии, директор Института синхротронных исследований РНЦ «Курчатовский институт», ученый секретарь Совета при Президенте РФ по науке и высоким технологиям. Сфера научных интересов — когерентное взаимодействие рентгеновского излучения с различными конденсированными средами, поверхностно-чувствительная рентгеноструктурная диагностика, нанотехнологии.



**Вера Всеволодовна Клечковская**, доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией электронографии. Занимается исследованиями структуры органических, неорганических пленок и нанокompозитов методом дифракции электронов высоких энергий.



**Лев Абрамович Фейгин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории малоуглового рассеяния. Область научных интересов — использование малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов для изучения структуры конденсированных фаз и тонких пленок. Заслуженный деятель науки РФ.

© М.В.Ковальчук, В.В.Клечковская, Л.А.Фейгин

ного анализа, благодаря чему этот мир стал для исследователя видимым в объеме. И на базе трехмерного видения стала вырисовываться масса интереснейших биоинженерных, биотехнологических идей. Сегодня мы наблюдаем, как плавное развитие биоорганического материаловедения перешло в стадию взрывного роста.

Современное материаловедение, таким образом, — многоплановая область знаний, где одновременно с сохранением основных существующих и востребованных материаловедческих направлений развиваются качественно новые идеи, прежде всего связанные с созданием наноматериалов различной природы и наносистем на их основе.

## Вторжение в наномир

В 1959 г. будущий нобелевский лауреат по физике Р.Фейнман прочитал лекцию с аллегорическим названием «Внизу полным-полно места: приглашение войти в новый мир физики, в мир миниатюризации» [2]. В ней Фейнман рассказал о фантастических перспективах, которые сулит изготовление материалов и устройств на атомном или молекулярном уровне. А в 1974 г. на конференции Японского общества точного машиностроения впервые был использован термин «нанотехнология» (автор, японский ученый Н.Танигучи, хотел обратить внимание специалистов на грядущий переход к обработке материалов с ультравысокой точностью, прогнозируя, что к 2000 г. эта точность шагнет в нанометровый интервал [3]).

В последнее десятилетие приставка «нано» прочно вошла в современный научно-технический обиход. Термины «нанотехнологии», «наноматериалы» и др. уже не кажутся странными, и нанотехнологии — переход с микро- на наноразмеры при создании устройств и систем,

структура которых регулируется в соответствующем масштабе, т.е. в диапазоне размеров атомов, молекул и надмолекулярных образований, — это дело уже не будущего, а настоящего времени.

Наноструктуры, построенные с использованием атомно-молекулярных элементов, представляют собой мельчайшие объекты, которые могут быть созданы искусственным путем или выделены из природных материалов. Причем проблема не только в уменьшении размеров конструируемых устройств, но и в особых свойствах, которые присущи нанослоям, нанокристаллам и наночастицам и связаны с так называемым размерным эффектом (критический размер нанобъектов хотя бы в одном измерении не должен превышать десятков нанометров). С этой точки зрения следовало бы рассматривать наноструктуры в качестве особого фазового состояния вещества, так как свойства материалов, образованных структурными элементами с подобными размерами, не идентичны свойствам объемной фазы. Причем изменения характеристик обусловлены не только малостью размеров, но и проявлением квантовомеханических эффектов при доминирующей роли поверхностей раздела.

Исследовательские работы последних 10—15 лет открыли важную роль наноструктур в различных областях науки и техники (физике, химии, материаловедении, биологии, медицине и т.д.). Управляя размерами и формой наноструктур, можно придавать таким материалам совершенно новые функциональные качества, резко отличающиеся от имеющихся у обычных материалов. К наиболее известным объектам таких манипуляций относятся нанопорошки, углеродные нанотрубки, «одноэлектронные» транзисторы, белки, ДНК.

Вообще говоря, все природные материалы и системы по-

строены из нанобъектов, так как именно на уровне молекул природа «программирует» основные характеристики веществ, явлений и процессов. Нанотехнологический подход означает уже целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном уровне. В идеальном варианте при использовании принципов самоорганизации вещества материалы должны создаваться «снизу вверх», в отличие от практикуемого до последнего времени подхода к ультраминиатюризации «сверху вниз» (когда мелкие объекты создаются из крупных, например, путем измельчения).

Одна из особенностей второй половины прошлого века — проникновение «широким фронтом» органических материалов, в частности полимерных, в технологии. Накопив знания и громадный опыт в области создания новых полимеров (в том числе биополимеров), химики научились синтезировать «умные» полимерные материалы, реагирующие на различные внешние воздействия желательным образом. Это достигается присоединением к основной полимерной цепи различных боковых «привесков», придающих новому материалу помимо материнских (например, термостойких) другие важные свойства — нелинейнооптические, фотопроводящие и др.

Важнейшая задача нанотехнологии — научиться встраивать органические и/или биоорганические молекулы в различные упорядоченные структуры в качестве новых функциональных элементов, в частности для восприятия изображений, запахов, звуковых и химических сигналов, т.е. для создания различных биосенсоров, в качестве преобразователей сигналов в информационных системах (биокомпьютеров) и для многих других целей.

Сейчас уже ясно, что наиболее перспективно создание органонеорганических наноконструкций. Для нанoeлектроники

оно в какой-то мере подобно формированию сложных микроэлектронных интегральных схем. Так можно построить последовательность из мономолекулярных диэлектрических и проводящих слоев с возможными включениями между ними наночастиц полупроводниковых, металлических, магнитных и др.

Разработка недорогих методов изготовления наноструктур в больших количествах — одно из важнейших направлений исследований, так как нанонаука может добиться реальных успехов лишь тогда, когда предложит экономически выгодные технологии.

### Как создать слой прогнозируемой структуры

Одной из наиболее привлекательных технологий для решения такого рода задач оказался метод, разработанный в 30-х годах прошлого столетия И.Ленгмюром и его ученицей К.Блоджетт. Об этом методе на довольно долгий период забыли, но затем, уже после второй мировой войны, вернулись «на новом витке спирали», чтобы использовать его возможности для конструирования сложных слоистых ансамблей из амфифильных молекул. В последующие годы интерес к пленкам Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ-пленкам) лавинообразно возрастал: поток работ был столь велик, что вышел за рамки публикаций в различных научных журналах — стал выходить специальный журнал «Langmuir». Каждый год проводятся специальные международные конференции «ЛБ», посвященные целиком тонким организованным пленкам, на многих физических и химических симпозиумах с широкой тематикой обязательно есть разделы, посвященные ленгмюровским монослоям и ЛБ-пленкам. Следует отметить, что в последние 10 лет от-

крылись значительно более широкие возможности ЛБ-техники для получения органонеорганических наноконструктов, чем предполагали ее создатели.

Какие же возможности конструирования сложных наносистем дает ЛБ-метод? Ответим на этот вопрос, рассматривая различные этапы процесса формирования слоистой пленки или композита.

Поскольку в журнале «Природа» о методе Ленгмюра—Блоджетт уже писали в период возрождавшегося интереса к нему [4], напомним лишь главные моменты.

Так называемая ленгмюровская ванна заполняется водой, трижды дистиллированной. На поверхность помещается капля поверхностно-активного вещества в органическом растворителе, который быстро испаряется. Рабочая площадь ванны ограничена подвижными барьерами — с их помощью площадь можно менять. Амфифильные молекулы вещества имеют

гидрофобный «хвост» (чаще всего зигзагообразную углеводородную цепочку) и гидрофильную «голову» (например, гидроксильную группу). Благодаря такому строению они не тонут в воде и ориентируются единообразно относительно поверхности — «хвостами» вверх (рис.1, вставка). Концентрация раствора рассчитывается таким образом, чтобы молекулы исследуемого вещества (после испарения растворителя) плавали свободно. Следующий этап — формирование конденсированного монослоя с помощью подвижного барьера — осуществляется за счет уменьшения рабочей площади ванны. Для характеристики структуры монослоя строят изотерму сжатия (рис.1) — зависимость размера площади, приходящейся на одну молекулу, от поверхностного давления (регистрируется изменяющаяся площадь рабочей поверхности ванны и с помощью весов Вильгельми измеряется соответствующее по-

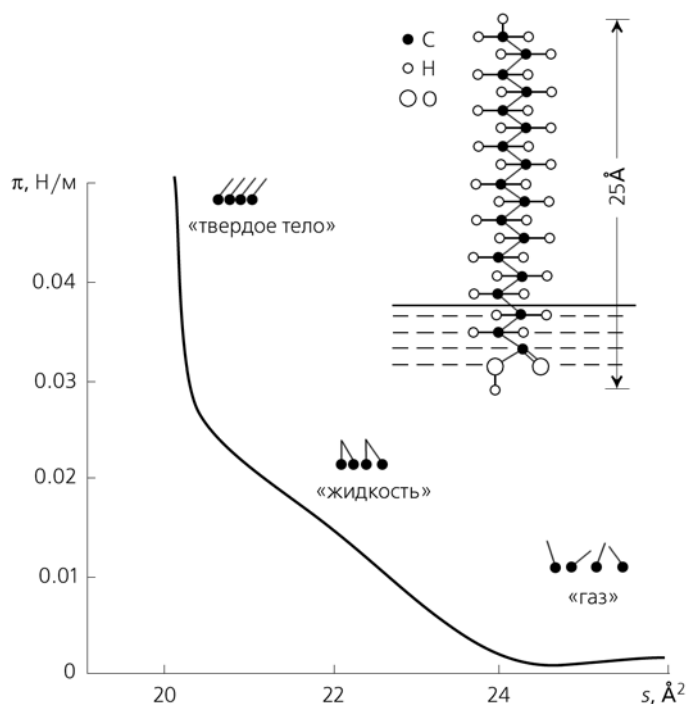


Рис. 1. Строение молекулы жирной кислоты и  $\pi$ -A изотерма. Три участка изотермы отвечают различным степеням уплотнения слоя, условно обозначенным на рисунке по аналогии с объемными фазами.

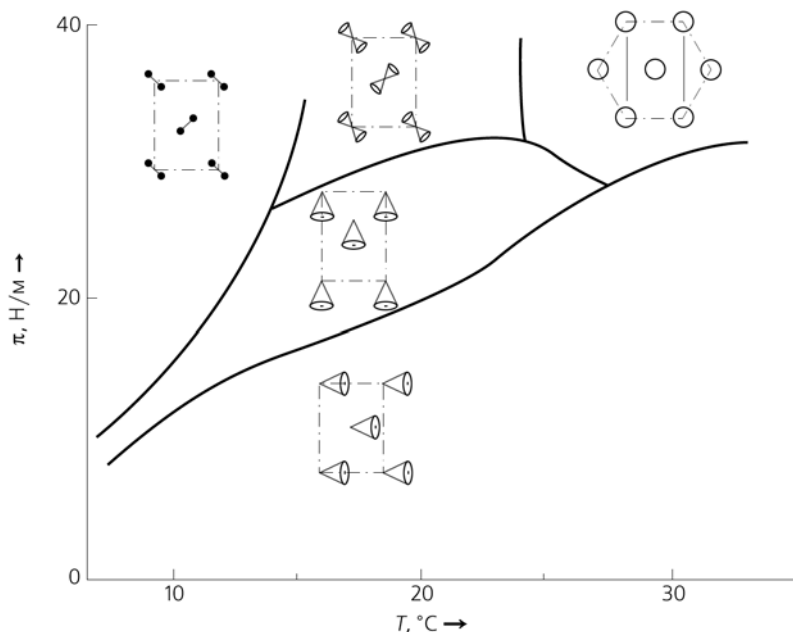


Рис.2. Фазовая диаграмма состояния монослоя арахидиновой кислоты.

верхностное давление). Можно контролировать также вязкость, электростатический потенциал монослоя (при этом один электрод помещается под монослоем, а второй над монослоем, так что по изменению потенциала можно почувствовать, например, переориентацию молекул), трансформацию микроструктуры монослоя (с помощью исследования в микроскопе при отражении света от монослоя под углом Брюстера).

Фазовая диаграмма формируемого монослоя даже для простейшего поверхностно-активного вещества — жирной кислоты — достаточно сложна (рис.2). Изменяются симметрия и параметры элементарных ячеек, взаимные наклоны цепочек в упорядоченных доменах. Но, изучив фазовое состояние монослоя данного вещества, можно понять, в каком диапазоне параметров эксперимента удастся получить монослои с заранее заданной структурой.

Однако пока наш монослой плавает в ванне, и следующий важный этап — перенос его на твердую подложку. Для этого подложка вертикально погружается в воду через монослой и затем поднимается (метод Ленгмюра—Блоджетт, вертикальный «лифт», рис.3,а) или горизонтально касается поверхности (метод Ленгмюра—Шеффера, горизонтальный «лифт», рис.3,б). Последовательным переносом монослоев мы можем приготовить многослойную наноразмерную пленку из мономолекулярных (по толщине) слоев, причем в зависимости от способа переноса и типа подложки (гидрофильной или гидрофобной), формируются структуры с различной укладкой молекул в смежных слоях, так называемые X-, Y-, Z-структуры (рис.3,в).

Такая технология позволяет усложнить конструкцию многослойной нанопленки, осаждавая последовательно монослои различных веществ, но и это еще не ставит точку в проектирова-

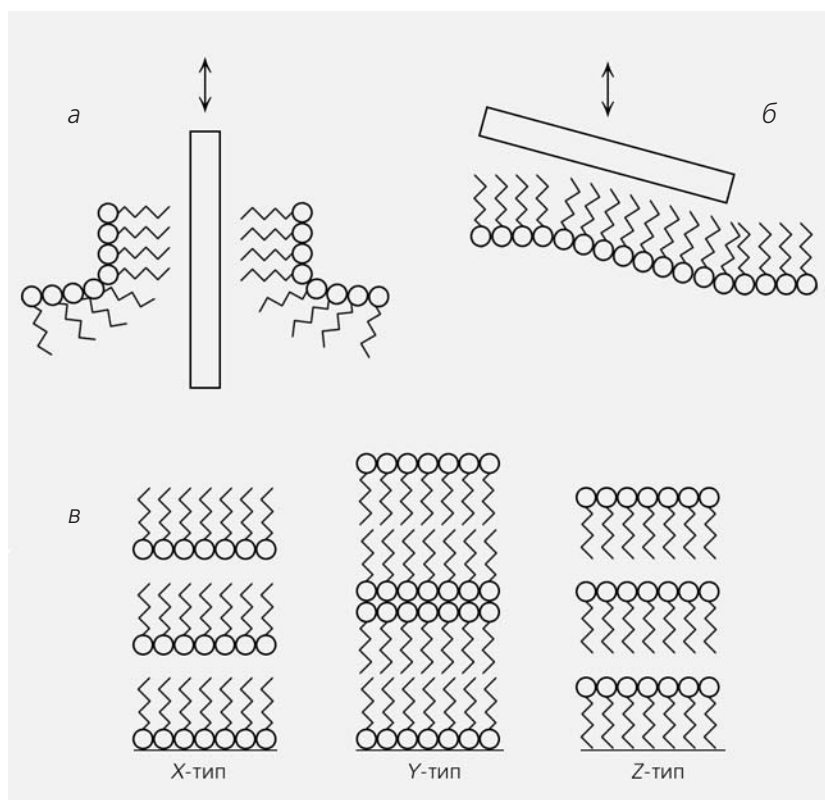


Рис.3. Перенос монослоя на твердую подложку вертикальным (а) и горизонтальным (б) лифтом и типы (X, Y, Z) формируемых слоистых структур (в).

нии и строительстве ЛБ-пленок. Где, на каких этапах и каким образом мы можем вмешаться в процесс?

### Коктейли из молекул в монослое

Дело в том, что на поверхности воды в ЛБ-ванне можно формировать монослой не только из молекул одного типа поверхностно-активного вещества — ничто не препятствует нам получить смешанный монослой из молекул различных веществ. Так были созданы модели разнообразных биологических липидных мембран, в том числе с включениями белковых молекул.

Структура многокомпонентного монослоя зависит от ряда факторов: взаимного соотношения количества веществ в монослое, соотношения длин главных осей молекул и их строения. Так, при одинаковых длинах главных осей молекул и близком строении длинноцепочечных фрагментов при определенном соотношении концентраций можно получить практически равномерно перемешанный слой. При том же соотношении, но существенно разных длинах цепочек, молекулы каждого сорта будут собираться в самостоятельные домены. На рис.4 приведены фрагменты профилей интенсивности рассеяния электронов на ЛБ-пленках из 10 молекулярных бислоев, существенно различающихся по строению и концентрации, и модели соответствующих структур в монослое. Наблюдается постепенный переход: от структуры с компактным размещением молекул одного вида и редкими вкраплениями молекул другого сорта по границам доменов первых — сначала к смешанным монослоям, где возможно возникновение при определенных соотношениях компонентов упорядоченной двухфазной структуры, а затем — к кристаллической до-

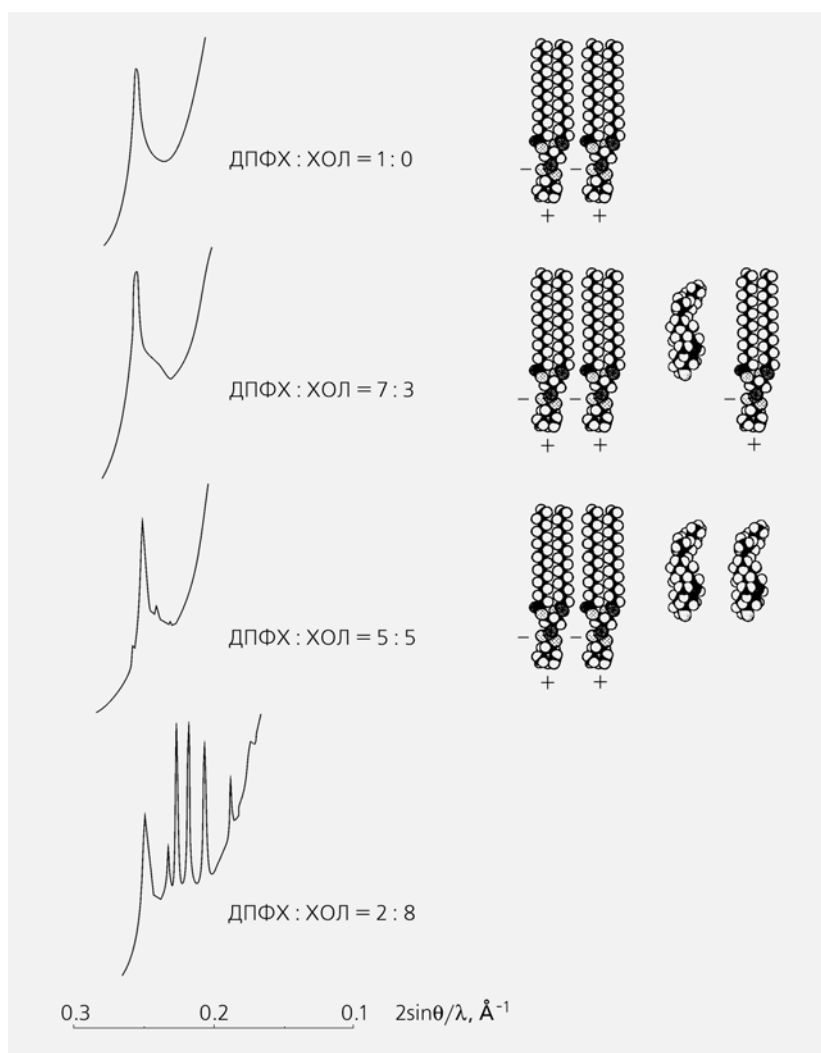


Рис.4. Профили электронной дифракции от двухкомпонентных ЛБ-пленок из монослоев с различным соотношением диметилфосфатидилхолина (ДПФХ) и холестерина (ХОЛ) и модели структурных элементов соответствующих монослоев.  $\lambda$  — длина волны электронов,  $\theta$  — угол рассеяния.

менной структуре второго компонента монослоя.

О методе исследования структуры тонких пленок («на просвет») и тонких слоев на поверхности («на отражение») (рис.5), использующем дифракцию электронов (методе электронографического структурного анализа), который сейчас оказался наиболее информативным для получения трехмерной информации о структуре тонких ЛБ-пленок, можно прочесть в журнале «Природа» за 1997 год

[5]. Здесь обратим внимание на то, что особенности используемых в ЛБ-технологии молекул, единообразно ориентирующихся на водной поверхности «хвостами» вверх, и сам способ формирования монослоя (равномерным поджатием) приводят к образованию текстуры (ориентированного поликристалла, у которого одна из осей перпендикулярна подложке). Если такую структуру перенести на подложку и получить от нее дифракционную картину, то при



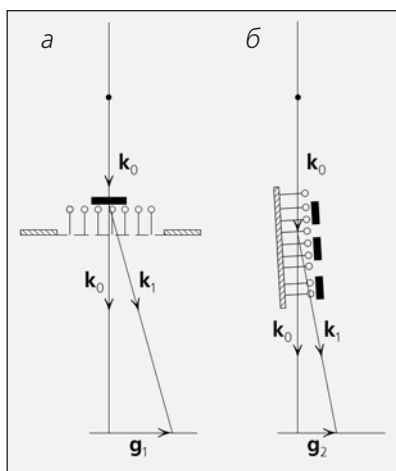


Рис.5. Схема формирования дифракционных картин при облучении образца электронным пучком «на просвет» (а) и «на отражение» (б) ( $k_0$  и  $k_1$  — векторы падающей и рассеянной волны соответственно,  $g_1$ ,  $g_2$  — вектора рассеяния).

падении пучка электронов на пленку под прямым углом мы увидим кольцевую картину, которая соответствует двумерной решетке в плоскости слоя. Но более ценными для полного представления о структуре ока-

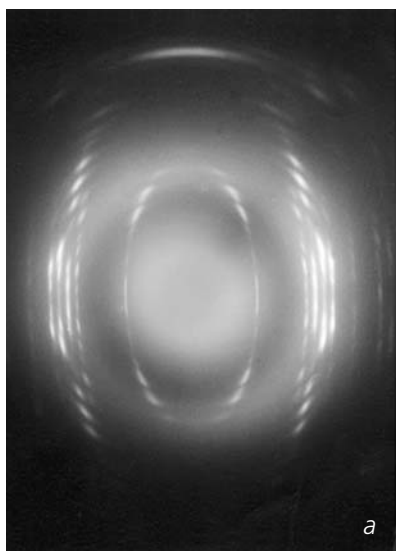


Рис.6. Электронограмма от ЛБ-пленки холестерина, полученная при наклоне образца по отношению к электронному пучку на угол в  $60^\circ$  (а), структура холестерина (б). Параметры элементарной ячейки:  $a = 14.17 \text{ \AA}$ ,  $b = 34.21 \text{ \AA}$ ,  $c = 10.48 \text{ \AA}$ ;  $\alpha = 94.64^\circ$ ,  $\beta = 90.67^\circ$ ,  $\gamma = 96.32^\circ$ .

зываются дифракционные картины, полученные при наклоне образца относительно электронного луча, когда у текстур выявляется упорядоченность и в третьем направлении (рис.б). По таким картинам можно провести полное структурное определение: установить симметрию, найти параметры элементарной ячейки кристалла и расположение в ней каждого атома. Если же в укладке молекул в конденсированном монослое имеются нарушения (отклонения от кристаллической упаковки), то на электронограммах от текстур четкие «дужки» будут размываться и по характеру и местоположению этих «размытий» можно оценить степень и тип нарушений в укладке молекул [6].

Что же, теперь мы исчерпали все возможности конструирования наносистем методом Ленгмюра, планируя дизайн слоистых гетероструктур из различных монослоев, в том числе многокомпонентных, и переноса их разными способами? Как оказалось, нет. Интерес исследователей обратился в первую очередь к водной фазе. Что будет, если ее модифицировать?

## Подключим к работе воду

Чтобы заставить воду служить активным рабочим элементом, будем менять ее pH (кислотность), растворяя в ней различные вещества, т.е. используем водную субфазу для проведения реакций взаимодействия монослоя с новыми ионами и молекулами.

Величина pH раствора играет очень важную роль: от нее зависит активизация гидрофильных «голов» молекул, погруженных в субфазу. Продемонстрируем влияние состава субфазы на простейшем примере: растворим в воде под монослоем жирной кислоты соль —  $Pb(NO_3)_2$ . В результате диссоциации в субфазе появятся ионы свинца, которые могут присоединиться к карбоксильным группам молекул поверхностно-активного вещества (рис.7), и при переносе на подложку мы получим уже не пленку жирной кислоты, а пленку ее соли. Так, используя субфазу, можно химически модифицировать монослой. Причем операция с субфазой, содержащей ионы металлов, в итоге дает возможность получить в зависимости от валентности ионов слою металлов (по толщине в один и более атомов), внедренные в органическую матрицу (которая обычно бывает диэлектрической). Если растворять соли редкоземельных элементов (например, гадолиния), получим прослойки с магнитным материалом и т.д. Процент поверхностно-активного вещества, участвовавшего во взаимодействии с ионами металла, зависит от pH раствора.

Таким же методом можно модифицировать монослой, присоединяя к ним из субфазы не только ионы металлов, но и белковые молекулы, нуклеиновые кислоты и т.д. Причем для формируемой структуры очень важны не только само вещество, из которого строится монослой на границе раздела вода—воздух, и «участник» из субфазы,



б

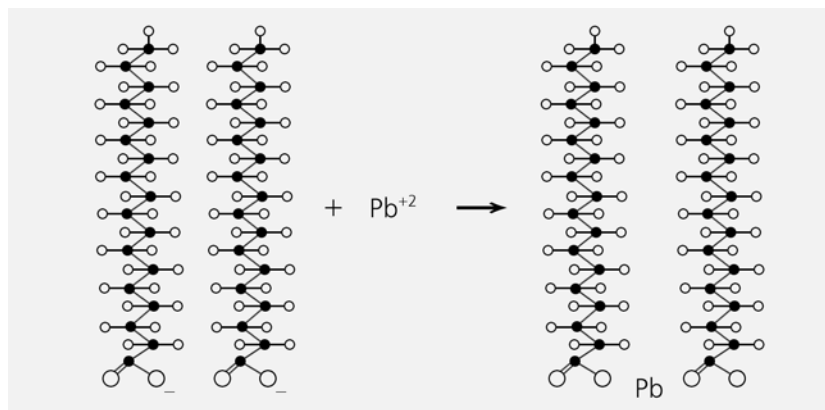


Рис.7. Схематическое представление формирования монослоя металла под слоем жирной кислоты.

но и их взаимодействие. Поместим в субфазу ДНК, а на поверхности сформируем монослой октадециламина или диметилалиламина. В результате получим ЛБ-пленку с включением между липидными слоями расплетенной (в первом случае) или спиральной (во втором) ДНК.

Итак, мы выбрали молекулы вещества, варьировали среду, на которой создается монослой. Остался еще один незадействованный фактор — атмосфера над поверхностью ванны. Что будет, если и ее привлечь к работе?

## Воздушный десант

Рассмотрим такой пример. На поверхности имеем монослой стеариновой кислоты, а в субфазе — ионы металла. Ограничим воздушный объем над ванной и создадим в нем определенную концентрацию паров  $H_2S$  (рис.8). Часть молекул газа растворится в воде, таким образом субфаза обогатится анионами серы. Тогда между катионами металла и анионами серы будет протекать химическая реакция, в результате которой образуются кристаллы сульфида.

Упорядоченный ленгмюровский монослой (структурной организацией которого, как помним, мы можем в определенных границах управлять) с при-

соединенными ионами металла — хорошая основа-подложка для зародышеобразования неорганических кристаллитов. Если подобрать условия эксперимента так, что активные группы молекул монослоя вблизи поверхности раздела создадут решетку, близкую по параметрам к решетке соответствующего сульфида, и обеспечить малую скорость поступления ионов  $S^{-2}$  в зону реакции (чтобы избежать спонтанного образования кластеров), то нанокристаллы сульфида будут расти эпитаксиально. Ориентированный рост неорганических кристаллов на органической матри-

це и их морфология важны, если предполагать дальнейшее использование такого рода структур в наноэлектронике. Заметим, что при этом ориентация нанокристаллов сульфида зависит как от структуры монослоя, так и от структуры самого сульфида. Например, на рис.9,а можно видеть электронномикроскопическое изображение наночастиц PbS, выращенных под монослоем стеариновой кислоты, в форме треугольников (кубические кристаллы со структурой NaCl, растут плоскостью (111) параллельно монослою). А на рис.9,б — электронномикроскопическое изображение кристаллитов CdS, выращенных в аналогичных условиях (их решетка также кубическая, с близкими параметрами элементарной ячейки, но относится к другому структурному типу). В этом случае наблюдается дендритный рост.

Процесс применения структурированной органической матрицы для синтеза и выращивания неорганических кристаллов получил название «биомиметика», что означает подражание живой природе. Материалы — органонеорганические наноконкомпозиты, полученные таким способом, в зарубежной литературе именуют керамикой или биокерамикой.

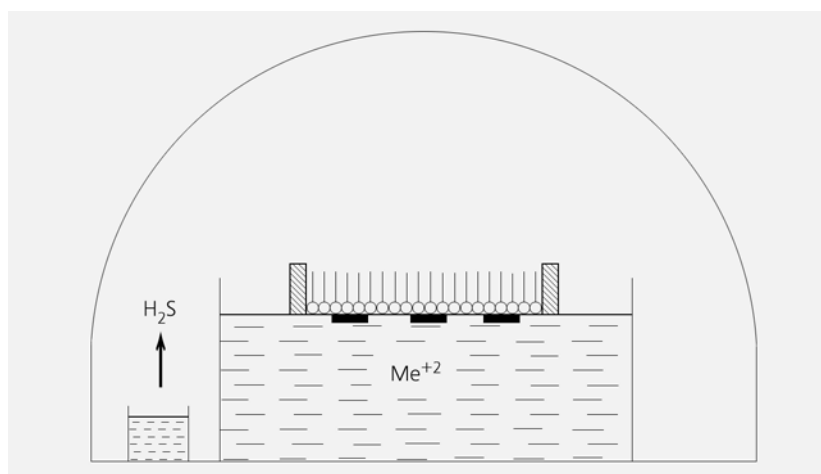


Рис.8. Схема установки для роста нанокристаллов неорганических сульфидов *in situ* в ленгмюровской ванне.

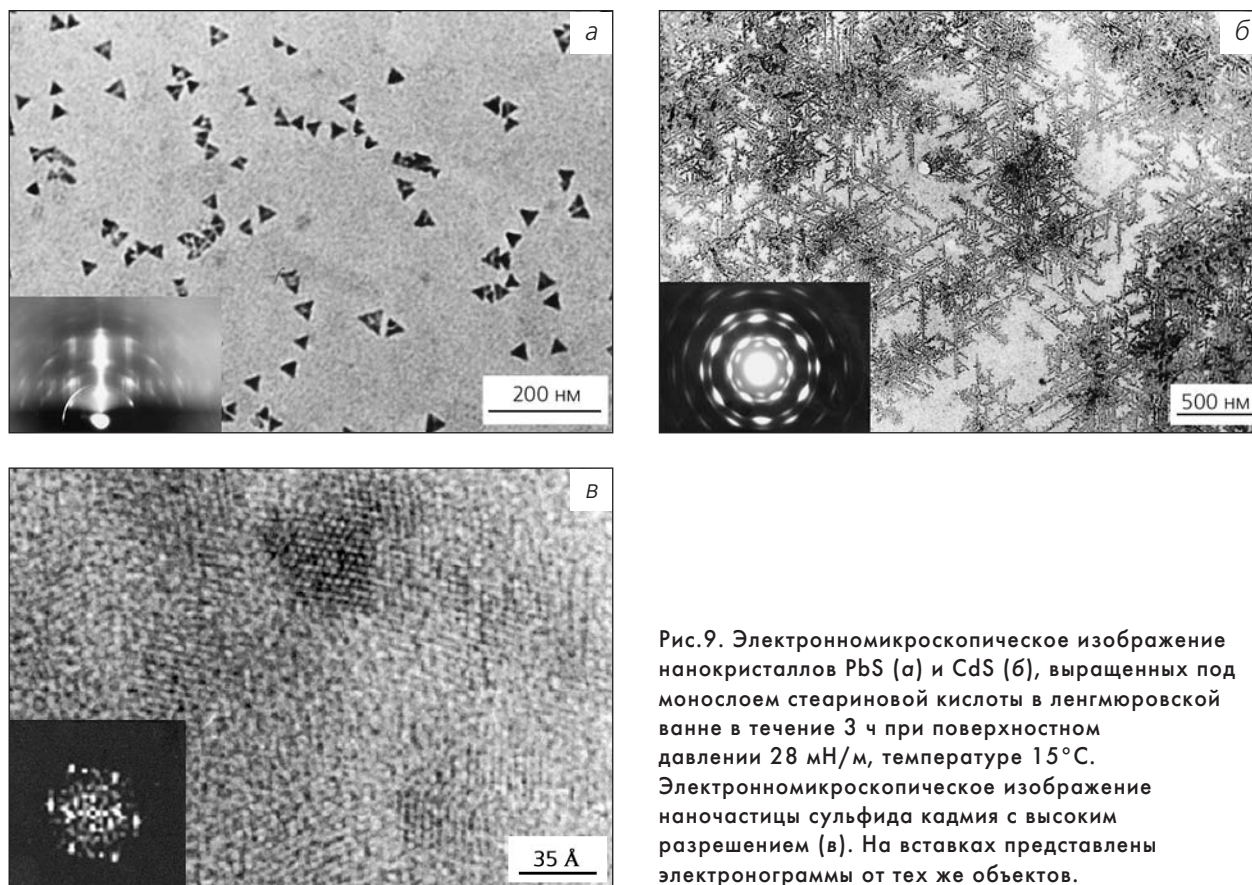


Рис.9. Электронномикроскопическое изображение нанокристаллов PbS (а) и CdS (б), выращенных под монослоем стеариновой кислоты в ленгмюровской ванне в течение 3 ч при поверхностном давлении 28 мН/м, температуре 15°С. Электронномикроскопическое изображение наночастицы сульфида кадмия с высоким разрешением (в). На вставках представлены электронограммы от тех же объектов.

В природе биоминерализация представляет собой процесс образования и роста неорганических кристаллов на органических тканях, в результате которого в живых организмах формируются кости, зубы, защитные панцири и т.д. Зарождение кристаллов происходит на биополимерной матрице, которая самоорганизуется в систему ориентированных ячеек, волокон или плоскостей и осуществляет биологический контроль за ростом кристаллов. Основные результаты использования принципов биоминерализации для выращивания кристаллов и тонких пленок, один из примеров которого мы только что рассмотрели, обобщены в книге Дж.Фендлера [7] и ряде обзоров [8].

Исследования процессов биоминерализации важны для разработки принципиально новых технологий получения высокодисперсных и тонкопленочных материалов. Для успешного

проведения биоминералогического синтеза необходимо ясное понимание природы молекулярного взаимодействия на границе органической и неорганической фаз, а также факторов, влияющих на зародышеобразование кристаллитов и последующий рост неорганической пленки. Существенно, что возможность модификации структуры монослоя на поверхности ЛБ-ванны открывает более широкие возможности при подборе условий для эпитаксиального роста, чем в случае твердых подложек.

Ленгмюровские пленки и нанокомпозиты на их основе уже нашли применение в качестве длинноволновых рентгеновских дифракционных решеток, резистов, газовых сенсоров, рабочих элементов первапорационных мембран (в последнем случае очень важно, что покрытия имеют контролируемую структуру и управляемую тол-

щину), наноразмерных диэлектрических полимерных покрытий и прослоек в различных устройствах и т.д.

## Ложка дегтя напоследок

Практически мы рассмотрели все возможные «инструменты» ленгмюровской технологии, с помощью которых можно конструировать гетероструктуру — нанокомпозит сложной слоистой архитектуры. Все выглядит очень привлекательно и действительно перспективно, но на самом деле это правильная, но довольно упрощенная схема. Почему ЛБ-метод еще не внедрен повсеместно? Потому что на кажущемся таким очевидным пути встречаются подводные камни. ЛБ-техника внешне проста и дешева (не нужен сверхвысокий вакуум, высокие температуры и т.п.), однако первоначально

требует значительных затрат для создания особо чистых помещений, так как любая пылинка, осевшая даже на одном из монослоев в гетероструктуре — это незалечиваемый дефект. С помощью электронной микроскопии и электронной дифракции мы обнаружили, что присутствующей в воздухе углекислоты достаточно, чтобы на ленточном монослое в ходе рассмотренного выше биомиметического процесса при определенных условиях могли вырасти еще и незапланированные кристаллы гидрокарбоната свинца. Структура монослоя полимерного материала, как выяснилось, существенно зависит от типа растворителя, в котором готовится раствор для нанесения на ванну, и т.д., и т.п.

В заключение следует сказать, что сейчас уже достигнуто понимание принципов, согласно которым можно планировать и осуществлять конструирование и производство наноструктур с помощью ленточной технологии. Однако требуются новые методы исследования характеристик уже изготовленных наноструктур, поскольку наш сегодняшний опыт ограничен моделями, работающими в диапазоне размеров  $>100$  нм. Поэтому мы сможем добиться большего прогресса в проектировании, изготовлении и сборке наноструктур только после того, как глубже поймем закономерности, определяющие физико-химические свойства таких материалов и их структурную обусловленность.

Рассказывая в своей лекции о фантастических перспективах, которые сулит изготовление материалов и устройств на атомном или молекулярном уровне, Фейнман указал, что тогда возникнет необходимость в создании совершенно нового класса рабочей и измерительной аппаратуры, требуемой для обращения со столь малыми, наноразмерными объектами. Предсказанная Фейнманом аппаратура появилась лишь в 80-х годах (сканирующие туннельные и атомно-силовые микроскопы, электронные микроскопы высокого разрешения нового поколения и другие приборы). Теперь исследователи обрели новые «глаза и руки», необходимые для создания и изучения структуры и свойств таких объектов. Одновременно значительный прогресс в вычислительной технике позволил моделировать характеристики материалов в наномасштабе.

Для исследования ЛБ-пленок, предмета нашего сегодняшнего рассмотрения, традиционно применяется рентгеновская и нейтронная рефлектометрия и дифракция электронов (о которой было несколько слов сказано выше) [9]. Однако дифракционные данные всегда усреднены по области, на которой сфокусирован пучок излучения. Поэтому они дополняются в настоящее время атомно-силовой и электронной микроскопией (при помощи электронной микроскопии высокого разрешения научились рассматривать строение отдельной наночастицы с атомным

разрешением, рис.9,в). Наконец, самые последние достижения в структурных исследованиях связаны с запуском синхротронных источников. Стали создаваться станции, в которых совмещаются ЛБ-ванна и рентгеновский дифрактометр, благодаря чему структуру монослоев можно исследовать непосредственно в процессе формирования на водной поверхности. В настоящее время развиваются методики, дающие спектрально-селективную структурную информацию, такие, например, как метод стоячих рентгеновских волн [10], адаптированный к кристаллическим слоистым системам. Этот метод основан на сочетании рентгеновского эксперимента в условиях дифракции или полного внешнего отражения рентгеновских лучей с регистрацией вторичного характеристического излучения (например, флуоресценции), возбужденного при фотоэлектрическом поглощении падающего рентгеновского пучка. Он удачно объединяет возможности высокоразрешающих структурных методик со спектральной чувствительностью получаемых данных.

Из вышесказанного следует, что нанонаука и развитие нанотехнологий еще находятся на начальной стадии развития, но потенциальные перспективы их широки, методы исследования постоянно совершенствуются. Пустое пространство внизу, о котором говорил Фейнман, постепенно заполняется, и работы впереди — непочатый край. ■

## Литература

1. Ковальчук М.В. Органические наноматериалы, наноструктуры и нанодиагностика // Вестн. РАН. 2003. Т.73. №5. С.405—411.
2. Feynman R. // Eng. Sci. 1960. V.23. P.22.
3. Taniguchi N. // Proc. Int. Conf. Prog. Eng. Part II. Tokyo, 1974.
4. Левченко Е.Б., Львов Ю.М. Молекулярное зодчество // Природа. 1990. №3. С.3—11.
5. Клечковская В.В. Дифракция электронов как метод изучения структуры // Природа. 1997. №7. С.32—40.
6. Вайнштейн Б.К., Клечковская В.В. // Кристаллография. 1994. Т.39. №2. С.301—309.
7. Fendler J.H. Membrane-mimetic approach to advanced materials. Berlin, 1994.
8. Bunker B.C., Rieke P.C., Tarasevich B.J. et al. // Science. 1994. V.264. P.48—55.
9. Клечковская В.В., Фейгин Л.А. // Кристаллография. 1998. Т.41. №6. С.975—982.
10. Novikova N., Zheludeva S., Konovalov O., Kovalchuk M. et al. // J. Appl. Cryst. 2003. V.36. P.727—731.

# Кристаллические вискеры и наноострия

Е.И.Гиваргизов

**В**о время второй мировой войны бурно развилась радиолокация — от примитивных станций до сложнейших радиотехнических монстров. Часто такие установки необъяснимо выходили из строя. Разгадка этому явлению пришла в конце 40-х годов: при обследовании станций на оловянных припоях, соединяющих радиосхемы, были обнаружены едва видимые глазом (диаметром 1—2 мкм) длинные металлические волоски, или нитевидные кристаллы, которые и были причиной коротких замыканий. Эти волоски, или усики, были названы вискерами, т.е. усиками кошки (не случайно рекламируемый нашим телевидением кошачий корм называется «вискас»).

Было высказано мнение (впоследствии подтвердившееся), что такие вискеры образуются под воздействием внутренних механических напряжений: когда к слою олова прикладывалось внешнее напряжение, скорость роста вискеро́в увеличивалась в 10 000 (!) раз. Было установлено, что таким же путем при комнатных температурах образуются кристаллические вискеры ряда других материалов с низкой точкой плавления (кадмия, цинка, сурьмы, индия и др). При повышенных темпе-



*Евгений Инвиевич Гиваргизов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пленочных и острийных структур. Область научных интересов — рост нитевидных кристаллов и микроэлектроника. Автор четырех монографий.*

ратурах (400°C) аналогичные вискеры растут на слоях никеля, меди, золота, железа, серебра и других металлов.

## Тайна роста нитей

Исследование свойств вискеро́в показало, что они обладают необычайно высокой механической прочностью, в 100—1000 раз превосходящей прочность массивных образцов того же материала и сравнимой с теоретически рассчитываемыми значениями.

Но не это было главным. Последовали обширные научные исследования, которые задавались основным вопросом: как объяснить формирование таких

необычных (по существу одномерных) кристаллов? В течение 50-х и в начале 60-х годов появилось несколько десятков публикаций на эту тему, где предлагались различные объяснения, порою фантастические. Например, известный факт иницирования роста вискеро́в примесями объясняли тем, что последние, осаждаясь на боковых, медленно растущих гранях вискера, блокируют их рост, а на быстро растущей торцевой грани примеси встраиваются в кристалл, не препятствуя его росту.

А ларчик просто открывался — его открыли американские ученые Р.Вагнер и У.Эллис из знаменитой фирмы «Bell Telephone». При тщательном ми-

кроскопическом обследовании вискеро́в кремния они обнаружили на вершинах нитей полусферические образования (названные глобулами). Их предшественники часто отмечали, что некоторые металлические примеси способствуют росту вискеро́в, но разумного объяснения этому факту дать не могли. Важность ряда примесей для образования вискеро́в подтвердили также Вагнер и Эллис [1]. Сопоставив все данные, они пришли к выводу, что одномерный рост вискеро́в объясняется действием жидкой капельки, которая образуется от взаимодействия кристаллизуемого материала — кремния — с локальными скоплениями примеси. В соответствии с фазовой диаграммой кремний—металл возникает микрокапелька сплава, поверхность которой идеально шероховата в том смысле, что там имеется огромное количество химически активных точек для присоединения попадающих на поверхность атомов и молекул, а потому она служит местом предпочтительной адсорбции различных веществ. Это означает, что всякая молекула, ударяющаяся о капельку, адсорбируется (застревает), проводит на ней значительное время (в масштабах молекулярных процессов) и там протекают химические реакции с выде-

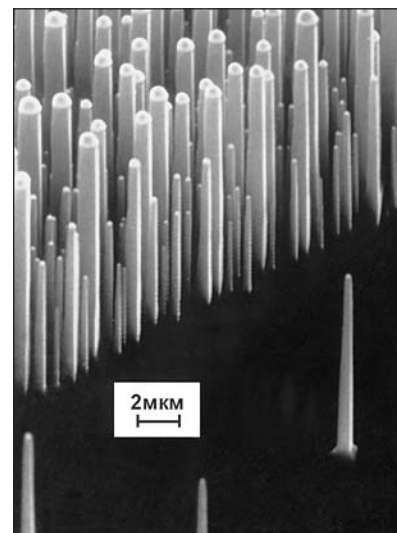
лением кристаллизующегося материала. Последний создает в капельке кристаллизационное пересыщение, в результате чего на границе капельки с подложкой происходит осаждение материала. Капелька отодвигается от подложки, и под ней образуется вискер, диаметр которого приблизительно равен диаметру капельки. Подобная ситуация реализуется и для других полупроводников, например арсенида галлия, фосфида индия (соединения  $A^3B^5$ ), сульфида кадмия, селенида цинка (соединения  $A^2B^6$ ); правда, в случае самого первого примера с ростом нитей из олова работает иной механизм.

Открыв механизм роста вискеро́в по схеме пар—жидкость—кристалл, Вагнер и Эллис «вскрыли первый пласт» и объяснили бывшие до того загадочными явления нитевидного роста кристаллов. Однако более важным для науки о росте кристаллов оказалось то, что это открытие проложило путь к управлению выращиванию вискеро́в: отныне, затравив отдельные точки подложки капельками жидкой фазы, стало возможным и вырастить на этих точках вискеры, и целенаправленно изучать детали их роста, наблюдать и исследовать кинетику кристаллизации и т.д. В частности, выбрав подходящую крис-

таллографическую ориентацию подложки — наиболее плотно упакованную грань для данного типа материала, — можно обеспечить рост вискера в направлении, ей перпендикулярном. Это объясняется исключительно активной ролью жидкой фазы при осаждении вещества из паровой фазы: если в первый момент капля «обнимает» несколько граней, гладкую торцевую и ступенчатые, то ступенчатые — в принципе всегда растущие быстрее гладких — под действием жидкой фазы растут еще скорее, а потому исчезают. В итоге остается лишь гладкая (т.е. плотно упакованная) грань на вершине, и вискеры ориентируются по отношению к подложке перпендикулярно. Если капелек много, то растет «лес» (точнее «травка») из кристаллических вискеро́в, перпендикулярных подложке (рис.1).

После открытия механизма роста пар—жидкость—кристалл, в начале 70-х годов в Институте кристаллографии были проведены детальные исследования кинетики роста систем вискеро́в на подложке. При этом для достоверности результатов очень важно обеспечить, чтобы процессы роста вискеро́в начались одновременно и заканчивались одновременно. С этой целью использовался процесс кристаллизации с высокочас-

Рис. 1. Вискеры кремния (снимок в растровом электронном микроскопе, угол падения сканирующего луча  $30^\circ$ ). Здесь капельки золота были созданы только на части подложки (левый верхний угол). Отдельный вискер — результат случайной капельки. Полусферические образования, видимые на вершинах вискеро́в, — это закристаллизовавшиеся после завершения кристаллизации капельки (глобулы) жидкого сплава, состав которых определяется фазовой диаграммой кристаллизующего вещества (в данном случае кремния) и металла-инициатора роста вискеро́в (здесь — золота). Глобулы образованы беспорядочной смесью мельчайших кристаллитов кремния и золота.



тотным нагревом, когда детали кристаллизационной камеры нагревались индукционными токами Фуко. В итоге рост всех вискеро́в системы начинался практически мгновенно, когда достигалась оптимальная температура кристаллизации (обычно это около 900°C), и завершался также мгновенно, с выключением индукционного нагрева, причем одновременно прекращали подачу в реактор газообразной питающей смеси.

### Кинетика «под микроскопом»

При изучении кинетики роста вискеро́в нам сильно повезло в том отношении, что в конце 60-х годов появился новый мощный инструмент для исследований — растровые (сканирующие) электронные микроскопы. В растровом электронном микроскопе объект сканируют тонким электронным пучком синхронно и синфазно с разверткой на экране наблюдения. В результате взаимодействия пучка в каждой точке объекта возникают, например, вторичные электроны, и их число модулирует интенсивность луча в кинескопе (мониторе), на экране которого возникает увеличенное изображение объекта.

Такие микроскопы позволили заглянуть в чудесный мир вискеро́в. Эти объекты идеально подходят для изучения морфологии данным методом: растровые электронные микроскопы обладают большой глубиной резкости, а сильная зависимость коэффициента вторичной эмиссии электронов от угла падения пучка на поверхность резко увеличивает контраст изображения.

Были установлены более тонкие закономерности роста вискеро́в. Так, оказалось, что скорость роста вискеро́в зависит от диаметра иницирующей капельки (рис.2) — скорость тем меньше, чем меньше диаметр капельки, а самые маленькие капельки вообще не поднимаются над подложкой: они лишь образуют холмики и быстро испаряются (такие холмики показаны стрелками). После тщательных измерений скоростей роста вискеро́в для разных диаметров и анализа полученных зависимостей с позиций известных кинетических закономерностей роста кристаллов был сделан вывод, что эти зависимости объясняются эффектом Гиббса—Томсона. Этот эффект, как известно, состоит в том, что равновесное давление пара над искривленной поверхностью выше, чем над плоской. Поэтому

кристаллизационное пересыщение, которое измеряется превышением фактического давления пара над равновесным, оказывается ниже над искривленной поверхностью. При очень малом радиусе капельки пересыщение практически исчезает, и скорость роста обращается в нуль, т.е. существует критический диаметр, ниже которого — при данном общем пересыщении среды — нитевидные кристаллы вообще не растут.

Проведенные расчеты позволили найти этот критический диаметр [2]. В наших экспериментах по кристаллизации вискеро́в, в которых кремний выделялся за счет реакции восстановления его тетрахлорида водородом, критический радиус оказался равным 50 нм. Если использовать применяемый сейчас в микроэлектронной промышленности метод кристаллизации кремния за счет реакции термического разложения моносилана (гидрида кремния SiH<sub>4</sub>), то там общее пересыщение выше и критический диаметр может быть значительно меньше, например 5—10 нм.

Нам удалось обнаружить принципиально новое кристаллизационное явление — радиальную периодическую неустойчивость: образовавшиеся вискеро́в состоят из чередующихся шариков и перетяжек с приблизительно одинаковыми промежутками между ними (рис.3). Как указывалось выше, диаметр вискера определяется диаметром капельки на его вершине, а поскольку диаметр вискера практически не меняется, как видно на рис.1 (размер капельки сохраняется), то в данном случае происходит изменение контактного угла: контактный угол капельки на вершине вискера периодически варьируется. Как показывает рис.3, диаметры «дышащих» вискеро́в меняются несинхронно (т.е. последовательность толстых и тонких шариков у разных вискеро́в разная). Следовательно, вариации диаметра обусловлены внутрен-

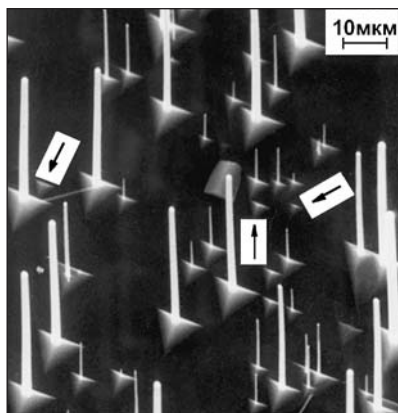


Рис.2. Сравнительная скорость роста тонких и толстых вискеро́в. У всех вискеро́в рост начинался и прекращался одновременно.

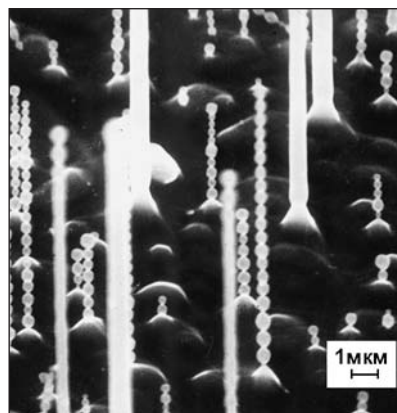


Рис.3. Радиальная периодическая неустойчивость роста тонких кремниевых вискеро́в.

ней природой данного вискера, а не внешними условиями (например, температурой процесса или интенсивностью подпитки осаждающимся веществом — в таких случаях диаметры разных вискеро в одном и том же процессе изменялись бы синхронно). Естественно предположить, что периодическая неустойчивость имеет автоколебательный характер [3].

Отметим также, что у сравнительно толстых вискеро в периодическая неустойчивость отсутствует (рис.3). Это явно указывает на решающую роль сил поверхностного натяжения в ее развитии: у тонких вискеро в такие силы значительно больше. Еще один факт в пользу такого мнения: периодическая неустойчивость исчезала, когда в процессе кристаллизации вискера в кристаллизационную среду вводили легирующую примесь, например мышьяк (типичная примесь, придающая полупроводнику кремнию проводимость *n*-типа). Известно, что такая примесь снижает поверхностное натяжение капельки сплава.

## Острия в строю

Если частицы металла — инициатора роста вискеро в — имеют одинаковые размеры и нанесены регулярным образом (например, на равных расстояниях друг от друга), то возможно вырастить регулярную систему вискеро в (рис.4). Такие системы кремниевых столбиков могут найти разнообразные применения. Прежде всего напрашивается идея создать полевые острийные эмиттеры электронов или ионов. Но для этого столбики должны иметь малый радиус закругления у вершины: тогда, прикладывая к ним сравнительно невысокие электрические напряжения (порядка тысяч вольт), можно создавать напряженности поля, достаточные для электронной ( $\sim 10^7$  В/см) и ионной ( $\sim 10^8$  В/см) эмиссий.

Были разработаны методики химического травления (растворения), позволяющие сделать из вискеро в острия: если воздействовать на вискер травителем, который растворяет кремний сравнительно медленно, то растворение начинается от границы раздела столбика с глобулой на вершине и распространяется к его основанию. Образуется «гриб» (рис.5), шапочка которого в какой-то момент отпадает (сваливается), и получается кремниевое острие. Результат травления системы вискеро в приведен на рис.6. Такие системы острий могут использоваться для создания эмиттеров электронов на большой площади, например, для плоских (небольшой толщины) полевых эмиссионных дисплеев, для плоских катодолюминесцентных источников света и др. В подобных источниках напротив системы кремниевых острий, на расстоянии 0.5 мм, устанавливается люминесцентный экран, к которому прикладывается потенциал +2000 В. Пространство между остриями и экраном откачивается до давления меньше  $10^{-6}$  торр. Электрическое поле срывает с острий электроны и разгоняет их в сторону экрана. Под действием бомбардировки электронами экран светится, как показано на рис.7. Такой источник света имеет малые габариты (по толщине), высокую квантовую эффективность и экологичен (по сравнению, например, с люминесцентными лампами). Он может найти применение для подсветки плоских жидкокристаллических дисплеев, обеспечивая хорошие яркость и контраст.

Кремниевые острия, полученные химическим травлением (они показаны на рис.6), могут быть дополнительно «отточены» по специальной методике термохимического заострения [4]. Она состоит в том, что сначала их окисляют, нагревая до высокой температуры (около 900°C) в среде влажного кислорода, при этом острие покрыва-

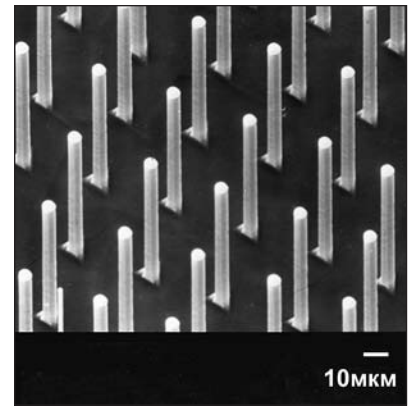


Рис.4. Регулярная система вискеро в кремния.

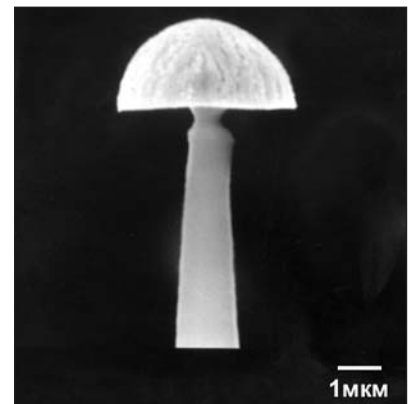


Рис.5. Промежуточная стадия превращения вискера в острие.

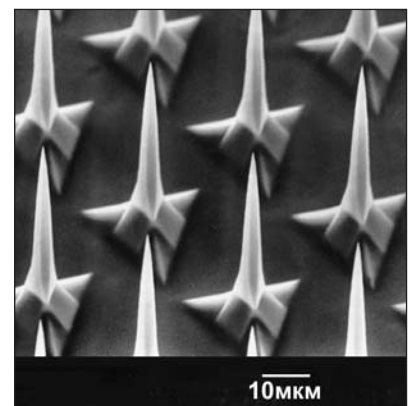


Рис.6. Система кремниевых острий.



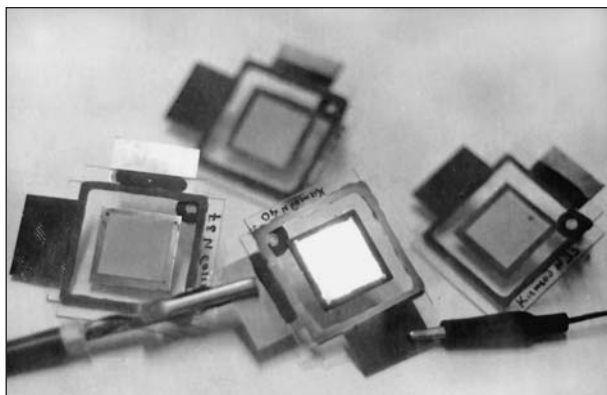
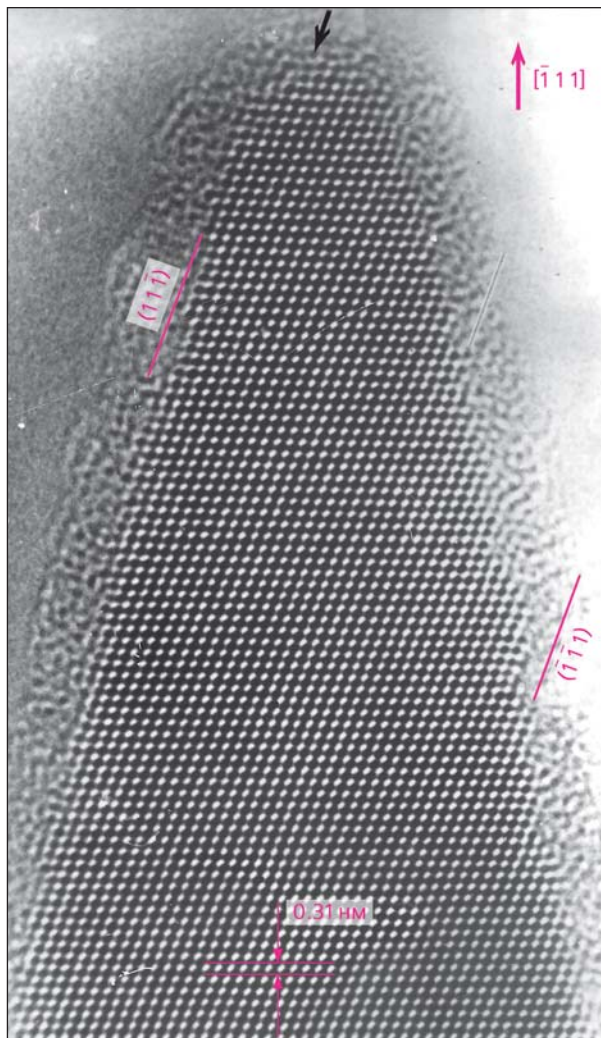


Рис.7. Катодолюминесцентные источники света. Работает лишь один из показанных на рисунке (центральный).

Рис.8. Изображение кремниевого ультраострия в просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения. Оболочка, покрывающая ультраострие, — это слой, образовавшийся из продуктов разложения вакуумного масла в результате пребывания острия в колонне электронного микроскопа. Каждая точка на острие изображает ряд атомов кремния, перпендикулярный плоскости снимка.



ется слоем двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  (кварцевое стекло), а затем окисел удаляют, обрабатывая острие в плавиковой кислоте. Было обнаружено, что по достижении кремниевым острием определенного, довольно малого радиуса закругления дальнейшее окисление прекращается — предположительно из-за того, что в верхней точке развиваются значительные механические напряжения вследствие сильного различия коэффициентов термического расширения кремния и его оксида\*. Так или иначе в результате этой термохимиче-

ской обработки кремниевое острие превращается в ультраострие, у которого на вершине остается единственный атом! Подтверждением сказанному служит рис.8 — на нем подобное острие сфотографировано с помощью просвечивающего электронного микроскопа с ускоряющим напряжением 200 кВ. В таком микроскопе изображение формируется электронами, прошедшими острие насквозь и рассеявшимися по-разному в различных его точках. Точность ориентировки острия достигается путем его поворота вокруг оси. На теле острия указан масштаб: 0.31 нм — это расстояние между атомными плоскостями кремния в кристаллографическом направлении

[111], в котором выращен висцер. На вершине стрелкой указан единственный (!) атом кремния на вершине острия. Пользуясь приведенным масштабом, можно оценить радиус закругления вершины: он составляет 2–3 нм.

С помощью описанной здесь методики термохимического заострения можно получать нанометрические кремниевые проволоки — квазиодномерные структуры, необходимые для быстро развивающейся нанотехнологии. Если радиус закругления ультраострия составляет 2–3 нм, то нанопроволока будет иметь диаметр около 5 нм — это тот размер, ниже которого в твердых телах начинают работать квантоворазмерные эффек-

\* Хорошо известен рекордно низкий коэффициент у кварца, благодаря чему даже раскаленное до красного каления кварцевое стекло не растрескивается, если его облить холодной водой.

ты и, например, кремний приобретает способность излучать в инфракрасной и видимой областях спектра, а это уже путь к кремниевой оптоэлектронике.

Еще одно направление, в котором кремниевые ультраострия, создаваемые из вискеров, играют важную роль, — изготовление зондов для атомно-силовой микроскопии. Зондовая микроскопия стремительно развивается и за последние несколько лет заняла лидирующие позиции в исследованиях самых разнообразных материалов благодаря относительной дешевизне (примерно на порядок величины) по сравнению с обычной электронной микроскопией. Но еще ценнее ее новые возможности: она не требует вакуума и работает даже в растворах, что открывает широчайшие перспективы для биологии, медицины, фармакологии. Ее ключевой компонент, определяющий разрешающую способность

(уже достигнут атомный уровень!), — это острый зонд. Однако существующие методы изготовления зондов (химическое или электрохимическое травление монокристаллической пластинки кремния) страдают принципиальным противоречием: утонение вершины зонда неизбежно влечет за собой его неустойчивость к механическим вибрациям. Идеальный зонд должен иметь массивное (диаметром по крайней мере несколько микрон) основание и очень острую вершину. Этого удается достичь при выращивании из паровой фазы, регулируя параметры процесса и применяя описанную выше методику термохимического заострения. Изготовленный таким образом зонд показан на рис.9. Радиус закругления ультраострия здесь составляет упомянутые 2–3 нм, а малый угол конуса при вершине (достижимы 2–3°) обеспечивает возможность исследовать

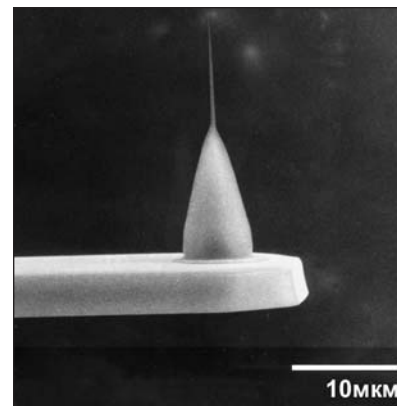


Рис.9. Кремниевое ультраострие на кантилере: зонд для атомно-силовой микроскопии.

сильно развитые поверхности, типичные для биологических макромолекул.

И можно не сомневаться, что приведенными примерами область применения наноострий не ограничится. ■

## Литература

1. *Wagner R.S., Ellis W.C.* // *Appl. Phys. Lett.* 1964. V.4. P.89–90.
2. *Гиваргизов Е.И., Чернов А.А.* // *Кристаллография.* 1973. Т.18. С.147–149.
3. *Givargizov E.I.* // *J. Crystal Growth.* 1973. V.20. P.217–226.
4. *Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V.56. P.236–238.

# Зачем нужна белковая кристаллография

Ю.А.Владимиров

Строение белковых кристаллов исследуют в основном, используя явление дифракции рентгеновских лучей. Расшифровав строение элементарных ячеек кристалла, мы узнаем структуру образующих их молекул. Иногда это одна молекула (иногда несколько), но главное, что расположение в ней многих сотен или тысяч атомов одинаково в кристалле, растворе и в живой клетке. Изучая создание рук человека — белковый кристалл, мы познаем устройство и способ функционирования белков, из которых в течение двух миллиардов лет было построено все живое на Земле.



**Юрий Андреевич Владимиров**, академик РАМН, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ. Соросовский профессор. Заведует кафедрой биофизики Российского государственного медицинского университета, кафедрой физико-химических основ медицины факультета фундаментальной медицины Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова и лабораторией белковой кристаллографии Института кристаллографии РАН. Руководитель отдела биофизики Научно-исследовательского института физико-химической медицины Минздрава РФ. Член редколлегий ряда международных и отечественных журналов.

## Белок под рентгеном

Белковая кристаллография стала возможной, после того как биохимики научились выделять достаточно большие количества чистого белка и выращивать качественные кристаллы. Эта процедура требует тщательности и времени, а успех во многом зависит от таланта и находчивости экспериментатора. Тем не менее к настоящему времени получены кристаллы нескольких тысяч различных белков.

Первую рентгенограмму кристаллов пепсина получили в 1934 г. английские ученые Джон Бернал и Дороти Хочкин. Наличие четкой дифракционной картины (системы рентгеновских пятен, или рефлексов) показало, что все молекулы белка имеют одинаковую упорядоченную структуру [1]. В рентгеноструктурном анализе параллельный пучок рентгеновских лучей направляется на кристалл,

где рассеивается атомами. В результате строго периодического расположения рассеивающих центров возникает дифракция лучей и появляются рефлексы. Их интенсивность служит исходным материалом, по которому восстанавливается конфигурация рассеивающего ансамбля. Однако расшифровать строение белка на основании дифракционной картины не могли, пока не знали, как определять фазы

© Ю.А.Владимиров

рассеянных рентгеновских лучей. Эту задачу решил М.Перутц с сотрудниками в 1954 г., используя рентгенограммы производных кристаллов, содержащих атомы тяжелых металлов в месте их связывания белковыми молекулами. С помощью такого метода изморфного замещения Дж.Кендрью с сотрудниками в 1958 г. получили пространственную конфигурацию миоглобина с разрешением 6 Å [2], а еще через два года — с разрешением 2 Å. Одновременно Перутц с сотрудниками установили строение гемоглобина с разрешением 5.5 Å [1].

В нашей стране изучение структуры белков методами рентгеновской кристаллографии и электронной микроскопии было начато Б.К.Вайнштейном с сотрудниками в 1959—1960 гг. в лаборатории структуры белка, созданной в Институте кристаллографии АН СССР. В 1975—1978 гг. расшифровали структуру растительного аналога гемоглобина, леггемоглобина, сначала с разрешением 5 Å, а затем 2.8 Å (рис.1). К настоящему времени в этой лаборатории определена структура 46 белков, причем для восьми из них с атомным разрешением, т.е. близким к одному ангстрему [3].

Чем совершеннее кристалл, тем выше может быть разрешение. Для выявления структур порядка одного ангстрема необходимы кристаллы размером около 0.5 мм в каждом измерении. Кроме того, кристаллы должны быть без дефектов. Один из нетривиальных путей — это их выращивание в условиях невесомости, т.е. в космосе. Действительно, такие опыты, проведенные в том числе и российскими химиками, показали, что в некоторых случаях в космосе качество кристаллов более высокое, скорее всего благодаря отсутствию гравитации, вызывающей конвекцию жидкости, которая мешает правильному росту кристалла.

В настоящее время в Международной базе белковых дан-

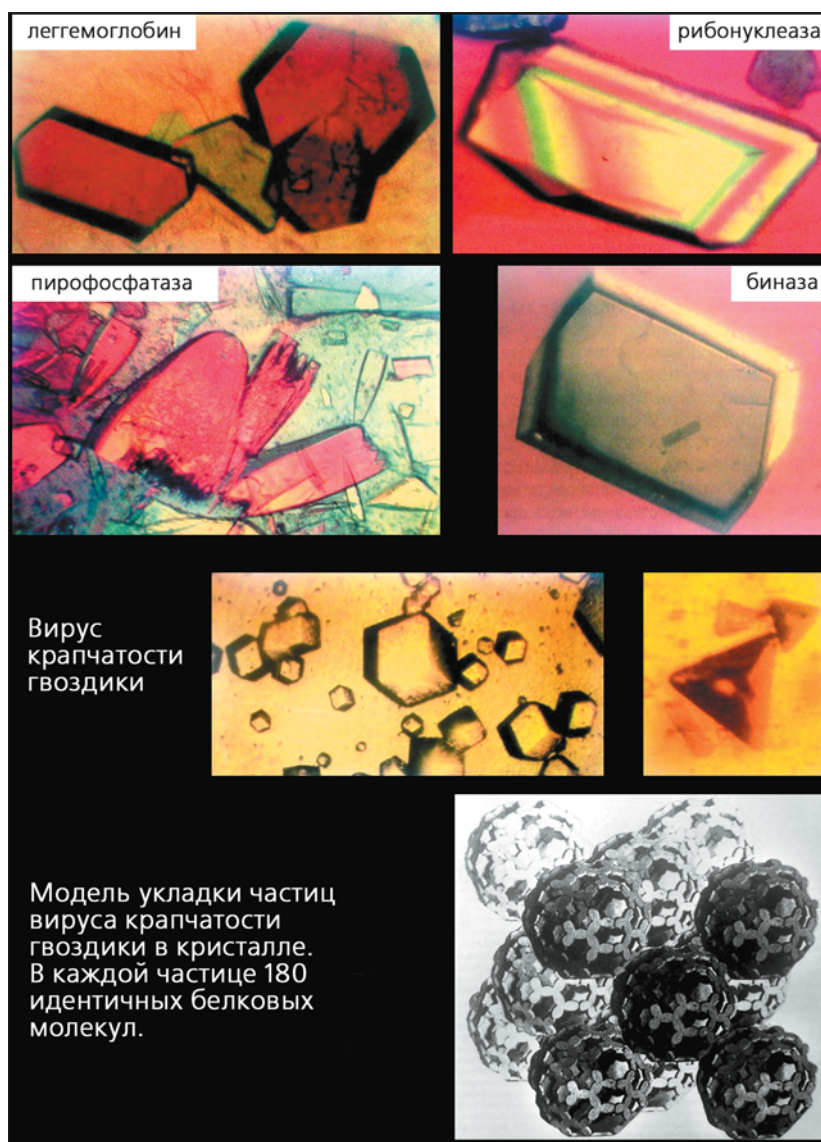


Рис. 1. Кристаллы некоторых ферментов (слева) и вирусов, полученные в Институте кристаллографии РАН.

ных хранятся более 22 тыс. структур, из которых около 5 тыс. — сами белки, а остальные — их производные (комплексы с субстратами, ингибиторами и т.д.) [4]. Знания структуры белков составляют основу современной энзимологии, молекулярной биологии и молекулярной теории эволюции, патологии, а также позволяют планировать создание новых лекарств и сверхмалых элементов компьютеров будущего.

## Переносчики кислорода и проблема эволюции белков

Гемоглобины выполняют в природе функцию запасаения и транспорта кислорода с помощью протетической группы — гема, комплекса двухвалентного железа с протопорфирином IX. Рентгеноструктурное исследование этих белков показали, что все они имеют одинаковую укладку (миоглобиновую свертку)

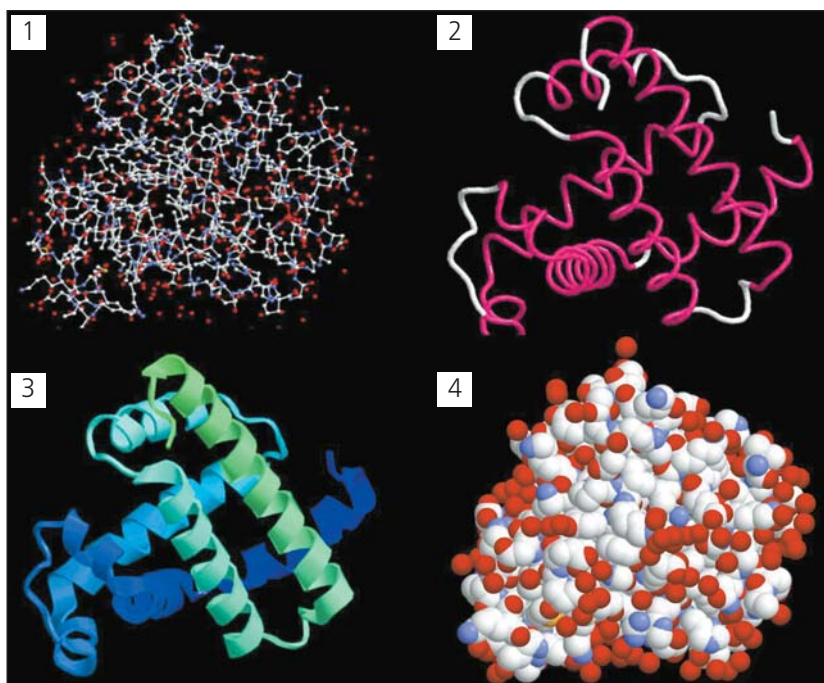


Рис.2. Компьютерные изображения структуры белка миоглобина. 1 — атомы в виде небольших сфер разного цвета: красные — кислород, белые — углерод, синие — азот, желтые — сера. Атомы водорода очень слабо рассеивают рентгеновские лучи и на изображении их нет. Красные сферы по краям белковой молекулы — это кислородные атомы структурированной воды, прочно связанной с белковой глобулой. 2 — общий ход полипептидной цепи. Участки  $\alpha$ -спирали выделены красным цветом, неструктурированные петли цепи — белым цветом. 3 — спиральные структуры в виде лент. 4 — атомы даны как сферы с радиусами Ван-дер-Ваальса. Рассматривая рисунки 1–3, можно подумать, что полипептидная цепь уложена рыхло и потому обладает большой подвижностью. Но это не так: белковая глобула выглядит как плотная гроздь атомов, лишенных возможности свободного перемещения (4).

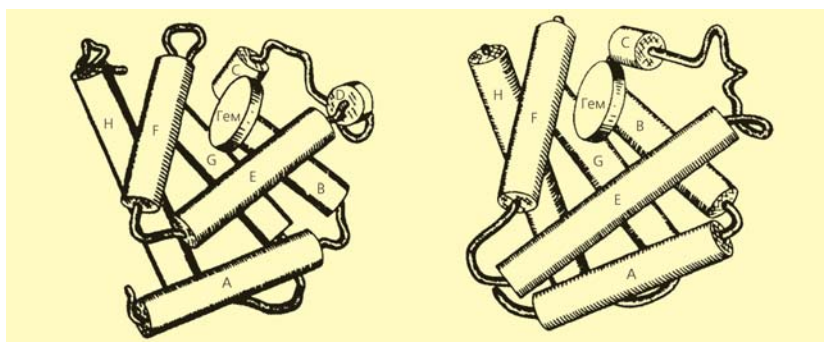


Рис.3. Общность строения миоглобина (слева) и леггемоглобина (справа).  $\alpha$ -спиральные участки полипептидной цепи показаны в виде цилиндров. (По Б.К.Вайнштейну [3]).

полипептидной цепи и организованный схожим образом активный центр (рис.2).

Уже на примере гемоглобинов стала понятной старая проблема биохимии: зачем для такого простого действия, как связывание маленькой молекулы кислорода или катализ химического превращения молекул (в основном тоже небольших), нужна огромная белковая молекула. Дело в том, что, свертываясь в клубок (глобулу), полипептидная цепь формирует в определенном месте пространственную структуру, идеально приспособленную для связи с субстратом, а затем (в ферментах) — для специфического катализа. С помощью рентгеноструктурного анализа точно определено пространственное строение активных центров и их комплексов с субстратами, без чего нельзя объяснить ни механизм связывания субстратов, ни их химические превращения в биологических объектах.

В последние десятилетия стало ясно, что в основе развития целых организмов лежит эволюция их белковых молекул. Причина изменчивости белков очевидна: это мутации, изменения в геноме, в результате которых меняется первичная структура белков, т.е. аминокислотная последовательность полипептидных цепей, формирующих белковую глобулу. Но при этом вовсе не обязательно изменение пространственной (третичной) структуры. Не только активные центры леггемоглобина, миоглобина и гемоглобина устроены сходным образом, но и укладка полипептидных цепей у них практически одна и та же (рис.3). При этом полезно вспомнить, что общие предшественники могли породить гемоглобин и миоглобин, встречающиеся у животных, и леггемоглобин растений не менее чем 1.3 млрд лет назад. За это время первичная структура белков сильно изменилась, а пространственная осталась почти не-

изменной, с небольшими различиями — в той мере, в которой новая функция белка (для леггемоглобина это связывание кислорода, необходимого для фиксации азота в клубеньках) потребовала другого средства к субстрату. Действительно, по средству к кислороду отдельные представители семейства гемоглобинов различаются более чем в  $10^5$  раз, что соответствует изменению в энергии связывания  $O_2$  на 7 ккал/моль [1].

## Работа ферментов

Одной из первых в нашей стране была расшифрована структура фермента каталазы, который разлагает перекись водорода на воду и кислород. Наиболее известны каталазы, в активный центр которых, как и у гемоглобинов, входит гем (рис.4). Однако строение активных центров у этих белков существенно отличается, что определяет специфичность их функций. Типичная гемовая каталаза имеет большую молекулярную массу (250—300 кДа) и обладает очень высокой каталитической активностью: почти каждое столкновение макромолекулы с субстратом заканчивается разложением субстрата. В молекуле каталазы четыре субъединицы сложены таким образом, что N-концевой участок полипептидной цепи каждой субъединицы проходит сквозь петлю, связывающую гемсодержащий домен одной субъединицы с доменом, включающим спиральный участок соседней. По правде говоря, до конца непонятно, зачем каталаза такая большая, если ее субстрат — крошечная молекула, да и активный центр тоже большим не назовешь.

Зная строение активного центра (рис.5) и способ встраивания в него субстрата, можно понять механизм катализа (превращения двух молекул пероксида водорода в одну молекулу воды и одну молекулу кислорода). Да и некоторые особеннос-

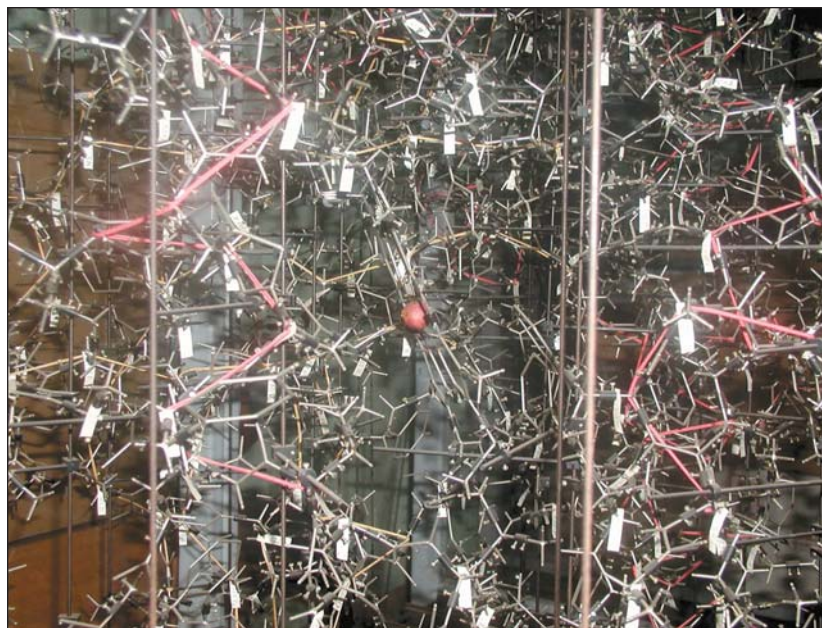


Рис.4. Фотография участка модели каталазы. Стержни — химические связи. Шарики на концах стержней — атомы. Красный шарик в центре — атом железа в геме. Красной проволокой обозначен ход полипептидной цепи в  $\alpha$ -спирали.

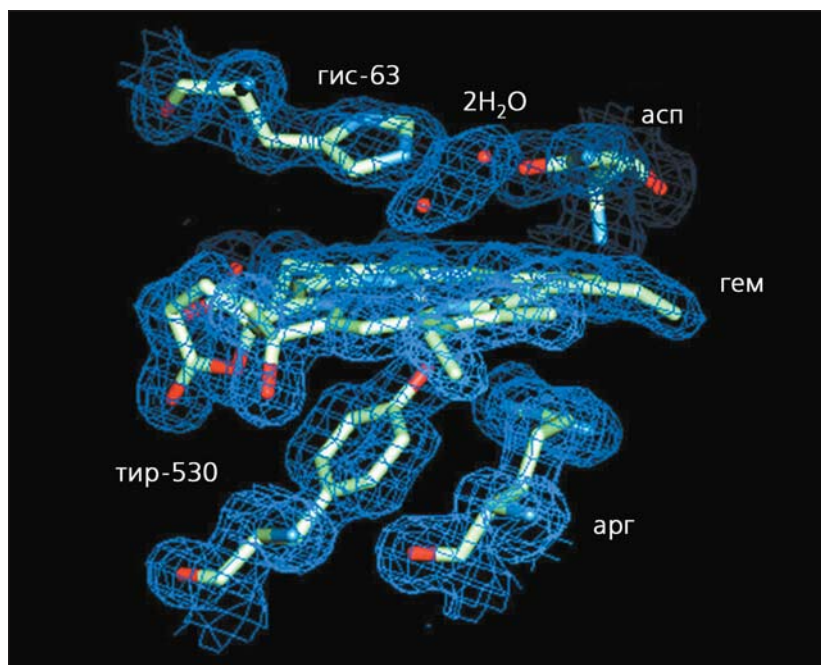


Рис.5. Активный центр каталазы *Penicillium vitale* с двумя молекулами воды, включающий гем (плоская группа в центре рисунка), аминокислотные остатки гистидина и аспарагина (вверху), и аминокислотные остатки тирозина и аргинина (внизу).

ти строения молекулы в целом также можно объяснить. Внутри этого гиганта имеются значительного размера каналы и полости (самая большая радиусом ~7 Å). Полости не сообщаются с поверхностью молекулы и обеспечивают, видимо, диффузию субстрата к реакционному центру. Два канала, главный и минорный, подходят к дистальной полости, где размещаются субстрат, продукты реакции или ингибитор. Главный канал (длина 30 Å, сечение на поверхности молекулы 15 Å) имеет форму конуса, сужаясь при приближении к месту реакции, так что доступ к гему для больших молекул ограничен, а для пероксида водорода — свободен. Внутренняя поверхность каналов выложена гидрофобными остатками (вероятно, чтобы полярные молекулы к ним не «прилипали»).

Может показаться, что такой сложный фермент не нужен: ведь соли многих металлов перемной валентности (например, железа или меди) тоже разлагают H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Однако при этом образуются свободные радикалы гидроксила, чрезвычайно активного соединения, способного повредить живую клетку. Так появились каталазы — защитные ферменты от перекиси водорода, которая всегда образуется в живых клетках. И сложное устройство этого белка, надо думать, не случайно.

Как и семейство гемоглобинов, гемсодержащие каталазы имеют свою, уникальную пространственную организацию, неизменную в течение эволюции. Во всех изученных гемовых каталазах укладка полипептидной цепи одинаковая, названная каталазным типом свертывания. С другой стороны, из сравнения гемоглобинов и каталаз видно, насколько свойства гема зависят от природы белковой глобулы: гем в разных белках выполняет разные функции.

Существуют каталазы, построенные из совершенно других цепей аминокислот и имею-

щие иной активный центр, в который входят два атома марганца, но отсутствует гемовая группа. Пространственную структуру димарганцевой Т каталазы из термофильной бактерии *Thermus thermophilus* определили в лаборатории Б.К.Вайнштейна в 1986—2000 гг. последовательно, при разрешении 3 и 1.0 Å. Ее молекула (молекулярная масса 200 кДа) состоит из шести идентичных субъединиц, образующих гексамер. Анализ структуры области активного центра позволил предложить механизм расщепления перекиси водорода [5]. Несмотря на разительные отличия в структуре, обе описанные каталазы выполняют одну и ту же функцию.

### Потоки электронов в клеточных структурах

Рентгеновские волны рассеиваются электронами, которые прочно привязаны к ядрам соответствующих атомов и самостоятельного интереса как бы не представляют. Но в последнее время непрерывно растет интерес к судьбе именно электронов

в биологических структурах вообще и в белковых молекулах, в частности. Ведь белки обеспечивают перенос электронов от субстратов окисления на молекулу кислорода, в результате которого клетка получает необходимую ей энергию. Иными словами, сегодня стремительно развивается молекулярная и клеточная биоэлектроника — новое научное направление, в котором изучается движение электронов в биологических объектах, в том числе в мембранных структурах (клеточная биоэлектроника) и макромолекулах (молекулярная биоэлектроника) и создаются биоматериалы для обработки и хранения информации.

Как раздел биологической науки молекулярная биоэлектроника — прежде всего часть биоэнергетики, поскольку основной источник энергии для живой клетки и организма в целом — это энергия, высвобождающаяся в ходе многоступенчатого переноса электронов по белковым и небелковым переносчикам во внутренних мембранах митохондрий аэробных организмов, в так называемой дыхательной цепи (рис.6). Изу-

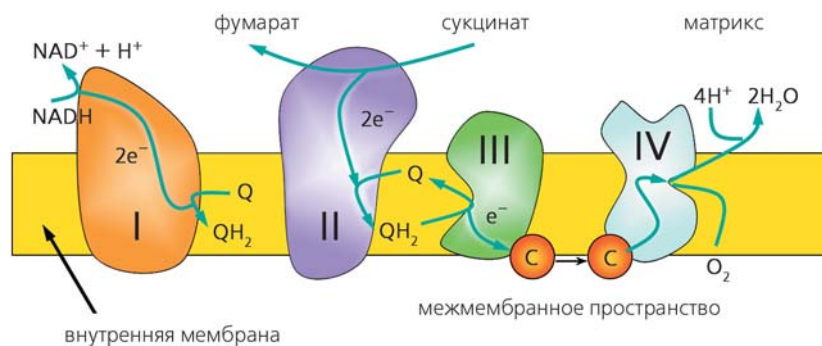


Рис.6. Схема строения дыхательной цепи во внутренней мембране митохондрий человека. Митохондрии осуществляют важнейшую для биоэнергетики клетки реакцию: фосфорилирование АДФ с образованием АТФ за счет энергии окисления молекулярным кислородом органических соединений, служащих субстратами окисления. Конечная стадия процесса — перенос электронов от восстановленных пиридиннуклеотидов или сукцината на молекулярный кислород — осуществляется по системе переносчиков электрона — дыхательной цепи. Римскими цифрами обозначены дыхательные комплексы, на которые мембраны митохондрий впервые разделил Д.Грин; строчными буквами — цитохромы (остальные сокращения общеприняты в биохимии).

чение механизмов переноса электронов в макромолекулах и между макромолекулами — важная составная часть биохимии и биофизики как теоретических дисциплин. Для медицины и ее теоретической основы, патологии, главный вопрос — это механизмы нарушения нормального потока электронов в дыхательной цепи и его последствия для жизнедеятельности клетки и всего организма.

Наконец, в технике биоэлектроника обещает найти применение (и уже отчасти его находит) для создания приборов и их элементов на основе таких сверхминиатюрных электронных устройств, как изобретенные самой Природой белковые молекулы. Здесь ключевым аспектом — это создание взаимодействия биологических материалов с электронными устройствами.

В дыхательной цепи электроны преодолевают по молекулярным масштабам довольно большие расстояния (многие десятки ангстрем, см. рис.7). Как же они это делают? В 40-е годы Н.Риль предположил, что белки обладают полупроводниковыми свойствами и потому электроны могут перемещаться по так называемым зонам проводимости. Эта идея, поддержанная лауреатом Нобелевской премии А.Сент-Дьердьи, приобрела некоторую популярность. Однако имеющиеся экспериментальные данные [6] и результаты измерения фотопроводимости белковых пленок [7] показали, что белки скорее изоляторы.

Согласно современным представлениям, перенос электронов внутри белковых молекул может осуществляться двумя путями: с помощью *эстафетной передачи* между подвижными доменами и благодаря *туннельному эффекту*.

Рассмотрим механизм эстафетной передачи на примере дыхательного комплекса III (комплекс *bc<sub>1</sub>*). Анализ белковой кристаллографии и ряда других результатов показал, что на участке гем цитохрома *c<sub>1</sub>* →

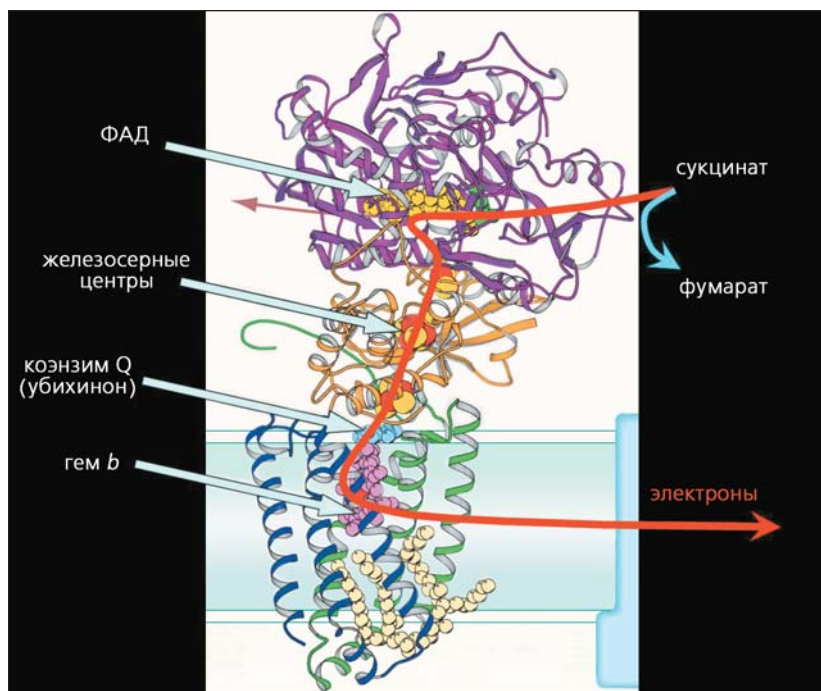


Рис.7. Перенос электронов внутри комплекса II. Электроны поступают от янтарной кислоты (сукцината), которая в ходе окисления углеводов в цикле трикарбоновых кислот превращается в фумаровую кислоту. Вначале электроны восстанавливают флавинадениндуклеотид (ФАД), а затем последовательно передаются на другие коферменты: три железосерные центра, коэнзим Q и гемовую группу цитохрома *b*. Путь (примерно 70 Å) электронов внутри комплекса показан красной стрелкой.

→ 2Fe2S-центр → гем *b<sub>L</sub>* цитохрома *b* электроны переносятся путем последовательного взаимодействия железосерного центра сначала с гемом цитохрома *c<sub>1</sub>*, а потом с гемом *b<sub>L</sub>* цитохрома *b* (рис.8).

Однако движение электронов между достаточно удаленными центрами осуществляется другим путем: вследствие так называемого туннельного эффекта, в результате которого частица может «просочиться» через потенциальный барьер. Эффективность туннельного переноса зависит от диэлектрических свойств среды: она повышена в неполярном окружении и снижена в поляризуемой среде. Расчеты, основанные на знании атомной структуры белковых молекул, показывают, что в пределах белков — переносчиков электронов — можно выде-

лить «туннели», или «трубы», по которым будет преимущественно переноситься электрон (рис.9). Таким образом, можно сказать, что белки представляют собой электронные устройства, внутри которых имеются «провода». Кроме того, как уже говорилось, некоторые белки обладают подвижными группами, способными в результате тепловых движений переносить электрон между двумя другими коферментами.

Совершенная организация систем переноса электронов в биологических мембранах, точнее, в белках-переносчиках электронов не роскошь, а суровая необходимость. Органические молекулы, из которых построено наше тело, имеют на орбиталях только спаренные электроны, химическая активность которых как бы взаимно



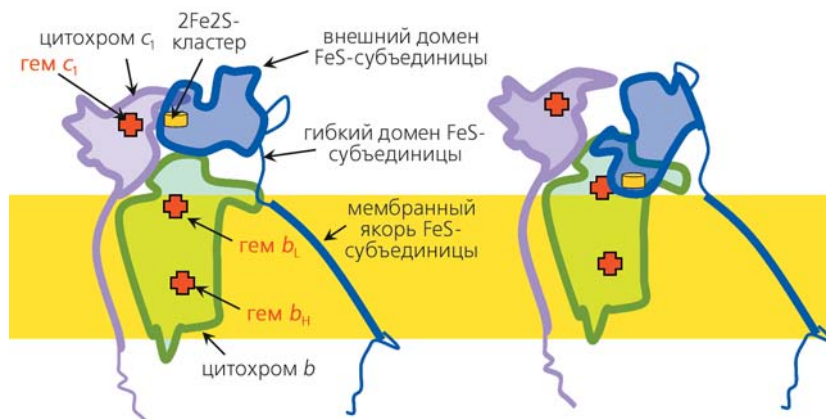


Рис.8. Эстафетный перенос электронов в комплексе  $bc_1$ . Полярная часть домена  $2Fe_2S$ -кластера прикреплена к якорной части домена гибкой полипептидной петлей, что придает достаточную подвижность полярной группе, и в результате тепловых движений она сталкивается то с донором (гемом цитохрома  $c_1$ ), то с акцептором электрона. Схематически изображены контуры белков, входящих в комплекс  $bc_1$  дыхательной цепи митохондрий (комплекс III). Слева — расположение цитохромов  $c_1$ ,  $b$  и субъединицы комплекса, содержащей железосерные кластеры, в момент, когда  $2Fe_2S$ -центр сближен с гемом цитохрома  $c_1$  и получает от него электрон. Справа — головка  $2Fe_2S$ -субъединицы в водной фазе повернута таким образом, что железосерный центр сближен с одним из гемов цитохрома  $b$  и может отдать ему электрон.

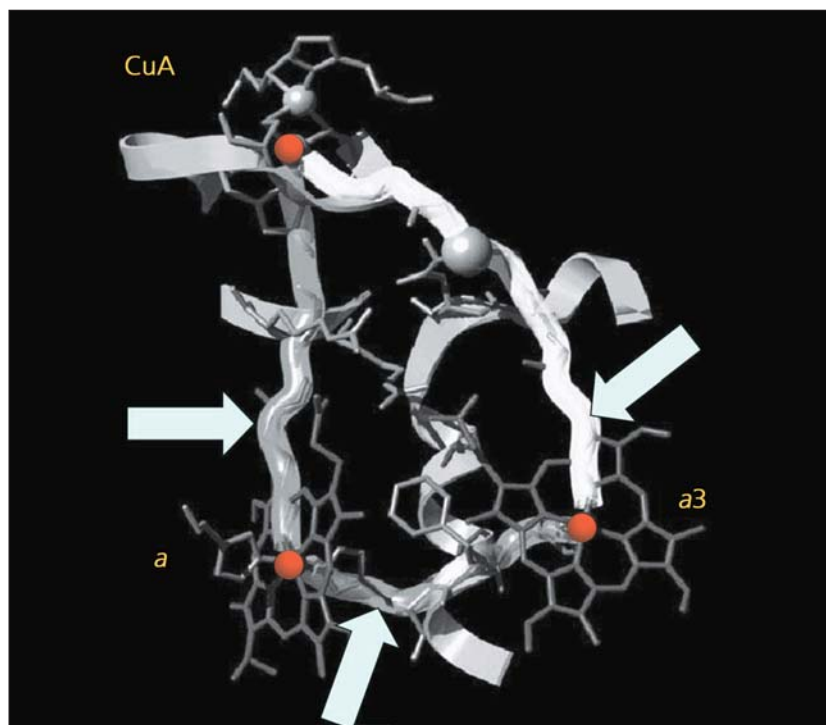


Рис.9. Туннельные трубы, по которым идет транспорт электронов в цитохромоксидазе. Стрелками обозначен туннельный перенос электронов между  $CuA$  и гемом цитохрома  $a$  (левая труба); между  $CuA$  и гемом цитохрома  $a_3$  (правая труба) и между этими двумя электронными потоками (нижняя труба).

скомпенсирована. Но если *одинокий* (неспаренный) электрон, путешествующий по системе электронного транспорта, вдруг «заблудится» и присоединится к органической молекуле или, например, к молекуле кислорода, образуются высокоактивные *свободные радикалы*, способные повреждать и разрушать биологические структуры.

В последние годы интерес к свободным радикалам чрезвычайно вырос не только в среде биологов, но и практикующих врачей. Сегодня свободные радикалы считают одной из главных причин всех так называемых болезней пожилого возраста, включая нервные заболевания, например старческое слабоумие и болезнь Паркинсона, а также иммунные расстройства, атеросклероз, рак, ревматоидный артрит, гипертензию и диабет.

Одна из основных причин усиленного образования радикалов — нарушение нормального транспорта электронов по дыхательной цепи митохондрий. Проблема в том, почему это происходит? Известно, что поврежденные митохондрии, как и митохондрии пожилых людей и старых животных, образуют больше радикалов кислорода, чем митохондрии молодые и здоровые. Но что именно ломается в дыхательной цепи и почему? Сравнение структур и биохимических свойств двух родственных белков-переносчиков электронов, сукцинатдегидрогеназы и фумаратредуктазы [8], показало близость их строений, а значит, и функций. Однако в качестве побочного продукта фумаратредуктаза производит в 25 раз больше радикалов кислорода. Это объясняется тем, что при работе дыхательной цепи в сукцинатдегидрогеназе электроны быстро оттекают от флавинадениндинуклеотида на  $[3Fe-4S]$ -кластер и на цитохром  $b$ , благодаря чему их избыток составляет в среднем 0.2 электрона, у фумаратредуктазы в силу больше-

го расстояния между центрами переноса электронов их отток происходит заметно медленнее, отчего там оказывается лишний электрон (1.0) и вероятность его переноса на молекулы кислорода резко возрастает. Мутации, приводящие к нарушению структуры полипептидной цепи в сукцинатдегидрогеназе, усиливают выделение радикалов кислорода, и, как следствие этого, развиваются генетические болезни [8].

### От знаний — к созиданию

Сегодня определение структуры белков входит в практику фармацевтических исследований, причем самые большие фармацевтические компании располагают соответствующим оборудованием для кристаллографии. Недавно появились небольшие компании, которые специализируются на структурных исследованиях, используя современные автоматизированные технологии (называемые high-throughput).

Знание трехмерной структуры белков-мишеней — отправная точка для конструирования лекарств с помощью топографии контактирующих поверхностей лиганда (связываемой молекулы, например субстрата, ингибитора или лекарства) и его белковых мишеней. Эти две поверхности должны повторять форму друг друга и содержать как можно больше точек притяжения — противоположных зарядов, участников водородных связей или просто гидрофобных групп. Такая информация может помочь химикам синтезировать новые вещества, которые должны лучше взаимодействовать с белками. Такие препараты будут более эффективными и избирательными. В продаже уже есть лекарства, созданные так называемым методом драг-дизайн (конструирование лекарств). К ним относятся препараты против вируса

иммунодефицита человека, такие как ампренавивр (Agenerase) и нелфинавивр (Virasept), полученные на основе использования структуры кристаллов ВИЧ-протеазы (рис.10).

Один из способов «подгонки» структуры лекарственного препарата к ложу для субстрата, расположенному в центре белка-мишени, — последовательный подбор фрагментов будущего лекарства перед окончательным синтезом. Вначале с помощью компьютерных программ подбирают молекулярные фрагменты, соответствующие форме и свойствам поверхности полости в активном центре белка. Пространственную структуру таких молекул (обычно небольших), как правило, находят в базе данных малых органических молекул. Чтобы убедиться в том, что отобранный фрагмент действительно вписывается в активный центр белка, проводят рентгеноструктурное исследование: его растворяют (обычно в диметилсульфоксиде) и добавляют к изолированному белковому кристаллу. Примерно через час молекулы проникают в активные центры кристаллического белка и можно начинать дифракционный эксперимент. Найдя несколько фрагментов, заполняющих разные области активного центра, синтезируют окончательную молекулу лекарства так, чтобы она вся оптимально встраивалась в молекулу-мишень. Таким образом осуществляется «стыковка» лекарства с белком-мишенью. Хотя большую часть этого процесса осуществляет компьютер, кристаллографическое исследование структуры необходимо как для его начала, так и для его завершения.

В истории фармацевтики методом драг-дизайна изучено приблизительно 500 мишеней. Это не так уж мало, тем не менее возможности еще далеко не исчерпаны. Следует помнить, что в геноме человека содержится 40 тыс. генов, что соответствует даже большему количеству бел-



Рис. 10. Пример драг-дизайна, основанного на знании третичной структуры белка-мишени. ВИЧ-протеаза представлена в формате полосок, а ингибитор ампренавивр — в виде атомов с радиусами Ван-дер-Ваальса. Выделены цветом аспарагиновые остатки в активном центре.

ков, которые могут быть синтезированы. Многие из них (если не большинство) — потенциальные мишени для новых лекарств различной молекулярной массы и структуры, а главное — разнообразного действия.

Открываются перспективы использования белковой кристаллографии и в других областях практической деятельности, в частности, в вычислительной технике. Здесь большие надежды возлагаются на светочувствительные белки — родопсин или бактериородопсин как ячейки памяти. Вместо электрического потенциала записывающим сигналом может быть луч лазера, другой луч используется, чтобы обнаружить изменения в данной ячейке. Так, бактериородопсин из галофильной водоросли под действием света переходит из одного исходного состояния (назовем его формой В) в другое (форму М), при этом изменяется его поглощение. В блоке трехмерной памяти молекулы бактериородопсина помещены в гель. Благодаря устройству фокусировки и развертки лазерных пучков в каждый момент времени свет попадает на одну определенную молекулу. Первый луч — записывающий, второй — считывающий. Поскольку размер ячейки очень

мал, память, построенная на бактериородопсине, существенно выше, чем на полупроводниковых материалах, как по плотности записи, так и по быстродействию.

Для медицины весьма полезны были бы сверхминиатюрные роботы, способные проникать в любое место нашего организма, в мельчайшие кровеносные сосуды и даже внутрь определенных клеток. Расшифровка структуры белков привела к интересному выводу: самые миниатюрные механические, оптические и электрические приборы и машины давным-давно созданы Природой. Например, вращающаяся часть фермента АТФазы из митохондрий и бактерий. Сам фермент можно рассматривать как крошечный электромотор, использующий энергию электричества, правда не электронов в металлических проводах, а протонов в водном растворе [9]. Впрочем, существуют и другие белки, способные преобразовывать энергию электронов, бегущих по белкам дыхательной цепи, в протонное электричество, которое накапливается в виде разности потенциалов на клеточных мембранах. Генераторы протонного электричества могут работать

не только на топливе, т.е. на энергии окисления органических молекул, но и от света. Так происходит, например, в молекуле бактериородопсина и в фотосинтетических центрах хлоропластов высших растений. Достижения науки в этой области, основанные на расшифровке атомной структуры биомолекул, поистине грандиозны и многообещающи. Если есть все элементы для построения молекулярного робота, то почему бы не начать его создавать? Но это — тема отдельного разговора.

\* \* \*

Рентгеноструктурный анализ белковых кристаллов — основной метод изучения пространственной структуры белковых молекул. В сочетании с другими биофизическими методами, в первую очередь с ядерным магнитным резонансом высокого разрешения и компьютерным расчетом укладки полипептидных цепей, белковая кристаллография позволяет раскрыть и объяснить механизм узнавания белками субстратов, ингибиторов, регуляторов, гормонов и лекарств; пути ферментативного катализа, процессов переноса электро-

нов; молекулярные механизмы преобразования энергии в живых клетках и многое другое. Знания о расположении атомов и работе активных центров лежат в основе всей современной молекулярной биологии и протеомики, служат путеводной нитью в белковой и геномной инженерии. Конструирование новых лекарств на основе драг-дизайна уже стало практикой в работе фармацевтических фирм. Будущее компьютерных технологий многие связывают с созданием базовых элементов компьютера, ячеек памяти и управляемых триггеров, с использованием белковых молекул, структуру которых можно усовершенствовать методами молекулярной биологии под контролем данных рентгеноструктурного анализа белков. Мировая наука вкладывает большие средства в развитие белковой кристаллографии, поскольку дифрактометры и высокопроизводительные расчетные, графические и синхротронные станции стоят недешево, как и работы по выделению, очистке и кристаллизации белков. Академия наук нашла возможность поддержать такие работы. Затраты эти безусловно окупятся, если мы этого захотим. ■

## Литература

1. Куранова И.П. // Кристаллография. 2001. Т.46. №4. С.667—686.
2. Вайнштейн Б.К. // Наука и жизнь. 1986. №8. С.37—45.
3. Вайнштейн Б.К. // Наука и человечество. 1986. С.153—173.
4. Blundell T.L., Jhoti H., Abell C. // Nature reviews. 2002. №1. С.45—54.
5. Мелик-Адамян В.Р., Арутюнян Э.Г., Поляков К.М. Пространственная структура белков // Природа. 1997. №7. С.61—69.
6. Владимиров Ю.А., Конев С.В. // Биофизика. 1957. Т.2. №1. С.3—19.
7. Владимиров Ю.А., Тимофеев К.Н. // Биофизика. 1966. Т.11. №1. С.33—40.
8. Yankovskaya V. et al. // Science. 2003. V.299. P.700—704.
9. Тихонов А.Н. // Сорос. образоват. журн. 1997. Т.7. №20. С.10—17.

# Фамильные минералы нашего института

Р.К.Расцветаева

**И**нститут кристаллографии им.А.В.Шубникова готовился к юбилею. Подводились итоги творческой деятельности большого коллектива. И тут, как нельзя кстати, пришло известие об утверждении Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации нового минерала — икранита. Он назван авторами открытия, Н.В.Чукановым и мной, по аббревиатуре ИКРАН — Институт кристаллографии Российской академии наук. В стенах нашего института выполнены многочисленные исследования кристаллических структур и в частности, икранита. Знаменательное и крайне редкое событие, когда новому природному соединению присваивается имя института, произошло третьего числа третьего месяца третьего года третьего тысячелетия, иными словами 3 марта 2003 г. А началось все 60 лет назад...

Шла война, но Лаборатория кристаллографии АН СССР продолжала свою работу в эвакуации на Урале. Здесь исследовался кварц для оборонной промышленности. После возвращения в Москву «кварцевую» лабораторию преобразовали в самостоятельный институт — тогда един-



**Рамиза Кераровна Расцветаева**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области структурной минералогии.

ственный в мире по комплексному изучению кристаллов. В 1971 г. ИКРАНУ присвоено имя его первого директора — академика А.В.Шубникова, в честь которого был назван и один из новых минералов. Впоследствии минералы называли именами и других сотрудников ИКРАНа.

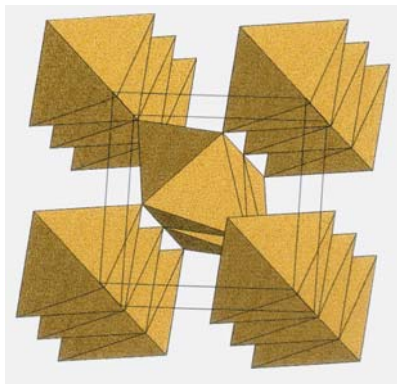
## Шубниковит

Этот водный хлорарсенат меди и кальция  $\text{Ca}_2\text{Cu}_8(\text{AsO}_4)_6\text{Cl}(\text{OH})\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  обнаружен Е.И.Нефедовым в 1953 г. в зоне окисления месторождения Хову-Аксы в Туве [1]. Шубниковит — редкий минерал красивого бирюзового цвета с шелковистым блеском, с молекулярным весом 1.6 г/см<sup>3</sup>. К сожалению, его структура до сих-

пор не расшифрована из-за изогнутой тонкопластинчатой формы кристаллов, не дающей шансов на получение современными методами необходимых дифракционных данных. Известны лишь (и то предположительно) ромбическая симметрия кристаллов и приближенные параметры ячейки:  $a=14.05$ ,  $b=14.08$ ,  $c=30.0 \text{ \AA}$ .

## Стишовит

Как правило, минералам присваивают имена маститых ученых, но бывает и по-другому. Стишовит назван в честь никому тогда неизвестного молодого аспиранта Сергея Стишова, только начинавшего свой путь в науке. Почти детективная история открытия минерала увле-



Структура стишовита. Октаэдры  $[\text{SiO}_6]$  образуют колонки, которые через кислородные вершины соединяются в трехмерную постройку.

кательно рассказана самим Сергеем Михайловичем на страницах журнала «Химия и жизнь» в двух очерках под названием «Высокое давление» [2]. Здесь мы упомянем лишь ее суть.

В 1961 г. в журнале «Геохимия» была опубликована статья С.М.Стишова и С.В.Поповой [3] об открытии новой плотной ( $4.28 \text{ г/см}^3$ ) модификации кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), в которой атом кремния окружен не четырьмя атомами кислорода, как в кварце, а шестью. Вещество было синтезировано Стишовым в Институте физики высоких давлений АН СССР в камере высокого давления из дробленного кварца Памирских месторождений при высоких температурах. По мере возрастания температуры и давления сначала кристаллизуется более плотная разновидность кремнезема — коэсит, а затем при давлении 100 000 атмосфер и температуре около  $2000^\circ\text{C}$  получается новая фаза в виде очень мелких пластинчатых и игольчатых кристаллов. Вскоре американский минералог Э.Чао обнаружил такую модификацию кремнезема и в природе — в Аризонском метеоритном кратере — и назвал ее стишовитом [4]. Минерал кристаллизуется по типу рутила с параметрами элементарной тетрагональной

ячейки  $a=4.177$ ,  $c=2.666 \text{ \AA}$  и симметрией  $P4_2/mnm$ . В его структуре октаэдры с атомами кремния, соединяясь по ребрам, образуют колонки. Четыре колонки объединяются с помощью пятой через вершины ее октаэдров.

Чтобы оценить значение этого открытия, нужно вспомнить, что многие геофизики вообще сомневались в существовании кремнезема с шестерной координацией атомов кремния. Стишовит стал первым примером столь радикальной перестройки кристаллической структуры основного породообразующего минерала Земли. Таким образом было доказано, что на определенных глубинах под влиянием высоких температур и давлений происходит изменение физического состояния минералов.

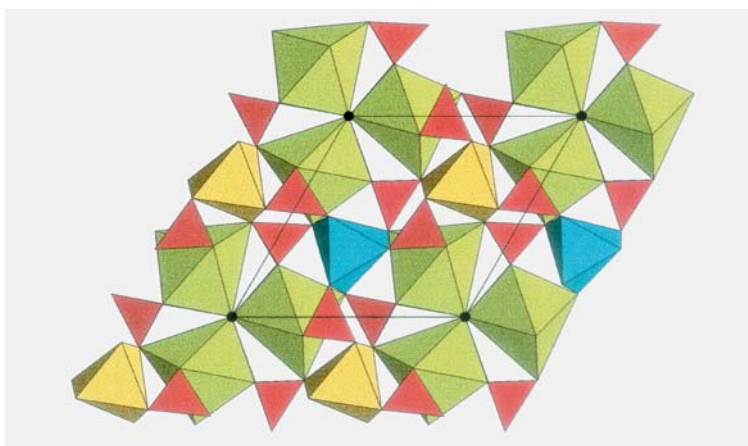
### Беловит и делонеит — родственники апатита

В настоящее время насчитывается свыше 4000 минеральных видов, и с каждым годом это число увеличивается на несколько десятков. Откуда же берутся новые минералы сегодня? Разве не исчерпаны природные кладовые еще полвека назад? И да и нет. Дело в том, что про-

цесс открытия минералов на современном этапе решающим образом зависит от детального исследования их атомного строения. И может оказаться, к примеру, что при схожести внешнего вида (а иногда и химического состава) минералы будут различаться внутренним строением, и тогда их отнесут к одной группе, но назовут разными именами.

Беловит и делонеит не исключение. Оба относятся к группе апатита  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ , важного породообразующего минерала, участвующего в формировании земной коры. Кроме того, апатит — биогенный минерал. Он входит в состав костей и зубов человека и животных. Но под этим названием объединяются около 20 минералов. Чем же они различаются? Прежде всего, составом. В качестве примесей к кальцию (а иногда и вместо него) в структуру апатита входят Na, Sr, Pb, Fe, REE. Фосфор замещается на V, As, С, а фтор на Cl или OH. Если какие-либо заместители начинают преобладать над другими элементами, они становятся видообразующими, а минерал обзаводится собственным именем.

Впервые прозрачные зеленоватые кристаллы беловита до 5 мм длиной найдены в 1950 г.



Апатитоподобная структура беловита и делонеита. Нанизанные на тройные оси октаэдры с атомами Na, Се, Ca, Sr и расположенные вокруг осей Sr-семивершинники объединены тетраэдрами  $[\text{PO}_4]$  в трехмерную постройку.

Л.С.Бородиным [5] в породах горы Малый Пункаруайв Ловозерского массива на Кольском п-ове. Минерал назван в честь выдающегося кристаллохимика Николая Васильевича Белова (1891—1982), который до последних своих дней работал в ИКРАНе. Он создал школу советских кристаллохимиков-структурщиков, исследовавших сложнейшие минералы класса силикатов. Еще в довоенные годы Белов занимался тонкой структурой апатита и разработал промышленный метод извлечения из него редкоземельных элементов. Вероятно, поэтому минералу, связанному с апатитом, присвоили его имя.

Делонеит—Се обнаружен А.П.Хомяковым [6] в районе горы Коашва Хибинского щелочного массива в виде ярко-желтых прозрачных кристаллов с сильным стекляннным блеском. Он назван в честь выдающегося российского математика-геометра Б.Н.Делоне (1890—1980) и утвержден в 1995 г. Борис Николаевич официально не был сотрудником нашего института, но его деятельность тесно связана с ИКРАНОм, он был членом ученого совета. Его метод поиска элементарной ячейки кристаллов используется во всех дифрактометрах мира и внесен в Интернациональные таблицы по рентгеновской кристаллографии. Белов и Делоне жили и работали в одно время, и минералы, названные их именами, находятся в тесной ассоциации, а иногда и в эпитактическом сростании друг с другом.

Параметры гексагональных ячеек в беловите  $\text{NaSr}_3\text{Ce}(\text{PO}_4)_3\text{F}$  и делонеите  $\text{NaCa}_2\text{SrCe}(\text{PO}_4)_3\text{F}$  близки ( $a=9.692$ ,  $c=7.201 \text{ \AA}$  и  $a=9.51$ ,  $c=7.01 \text{ \AA}$  соответственно), а набор видообразующих элементов, состоящий из Na, Sr и Ce, одинаков (за исключением Ca, который в беловите полностью вытеснен стронцием). Однако соотношение и распределение этих элементов [7, 8] в структуре (тут уж без рентгеноструктурного анализа не

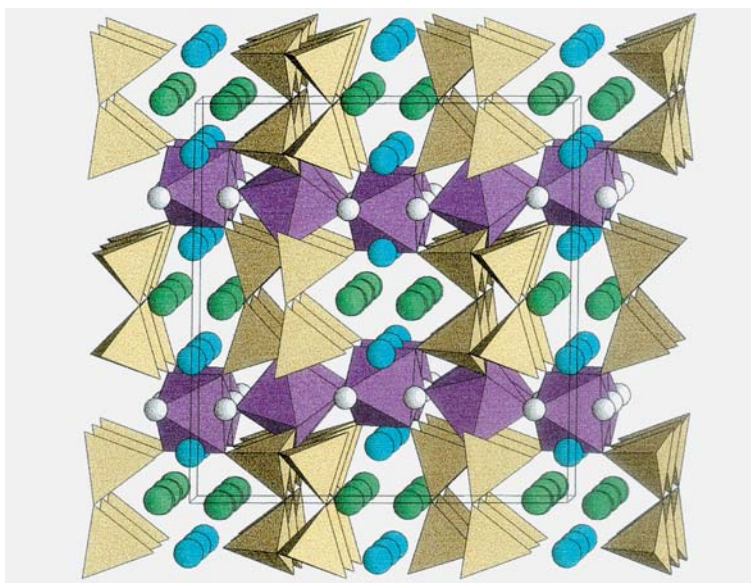
обойтись), а значит симметрия и другие свойства кристаллов различны. Более того, последующие исследования показали, что беловит не один минерал, а представляет собой совокупность минералов, различающихся составом редких земель. В образцах из Ловозера преобладает церий, а из Хибинского массива (на горах Кукисвумчорр и Эвслогчорр) — лантан. Беловит-La описан И.В.Пековым [9] как новый редкоземельный минерал из группы апатита и утвержден в сентябре 1995 г. уже после смерти академика Белова.

### Леммлейнит — минерал группы лабунцовита

Изучение обширной коллекции лабунцовитов из 12 щелочных массивов мира показало, что их весьма сложный и непостоянный состав приводит к значительным изменениям в кристаллической структуре. Это позволяет говорить о существовании в природе целого ряда самостоятельных минеральных видов, родственных лабунцовиту. Среди них и леммлейнит  $\text{Na}_2\text{K}_2\text{K}_2(\text{Ti,Nb})_4[\text{Si}_4\text{O}_{12}]_2(\text{O,OH})_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,

обнаруженный Хомяковым [10] в районе горы Коашва Хибинского щелочного массива. Он назван в честь Г.Г.Леммлейна (1901—1962), известного российского минералога и кристаллографа, который долгие годы работал в Институте кристаллографии и внес большой вклад в разработку учения о связи морфологии кристаллов с условиями образования.

Кристаллы леммлейнита удлиненные, размером до 1 мм, бесцветные и прозрачные с сильным стекляннным блеском. Параметры моноклинной ячейки:  $a=14.39$ ,  $b=13.900$ ,  $c=7.825 \text{ \AA}$ ,  $\beta=117.6^\circ$ , симметрия  $C2/m$ , плотность 2.80 г/см<sup>3</sup>. Родственность минералов группы лабунцовита обусловлена наличием единого каркаса, собранного из колонок вершинносвязанных октаэдров Ti (или Nb), скрепленных между собой четверными кремнекислородными кольцами  $[\text{SiO}_4]$ . Отличаются же они заполнением объемных каналов структуры. Из-за того, что колонки S-образно изогнуты, в месте их сближения может разместиться еще один октаэдр, который обычно заполняется атомами Fe или Mn. Для леммлейнита характерно высокое содержание щелочных



Структура леммлейнита. Шары голубого цвета — атомы Na, зеленого — K, белого — молекулы воды.

катионов с преобладанием К над Na и полное отсутствие Fe и Mn. Поэтому вместо дополнительного октаэдра в его структуре [11] располагаются атомы К.

Позже Чуканов и Пеков нашли на горе Карнасурт в Ловозерском массиве минерал с иным составом:

$\text{Na}_2\text{K}_2\text{Ba}_{1+x}\text{Ti}_4(\text{Si}_4\text{O}_{12})_2(\text{O},\text{OH})_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , который является новым высокобариевым членом группы лабунцовита [12]. Он образует прозрачные ярко-оранжевые, оранжево-красные и кофейные кристаллы призматического габитуса до 20 мм в длину. Параметры моноклинной ячейки:  $a=14.219$ ,  $b=13.755$ ,  $c=7.767$  Å,  $\beta=116.7^\circ$ , симметрия  $C2/m$ , плотность  $3.03$  г/см<sup>3</sup>. В нем реализуется предельно возможное для структурного типа лабунцовита катионное упорядочение: атомы Na, K и Ba практически полностью разделяются, занимая в структуре независимые кристаллохимические позиции A, B и C соответственно [13]. Минерал утвержден в сентябре 2000 г. под названием леммлейнит-Ва, при этом имя предыдущего минерала, утвержденное в мае 1997 г., в соответствии с принятыми принципами номенклатуры группы лабунцовита, изменено на леммлейнит-К.

Появление леммлейнита-Ва в Ловозерском массиве наряду с находками в Хибинском массиве вызывает особенный интерес ученых, поскольку породы Ловозера почти вдвое беднее барием, а количество бариевых минералов в Хибинах гораздо больше, чем в Ловозерском массиве. Таким образом, мы имеем яркую иллюстрацию того, как цеолитоподобная структура лабунцовита становится ловушкой для крупного катиона Ва, а минералы с одним и тем же названием, но с разными доминирующими элементами в какой-либо позиции, являются самостоятельными минеральными видами. Вот почему в группе лабунцовита имеется не один леммлейнит, а два.

## Икранит и расцветаевит — родственники эвдиалита

Термин «эвдиалит» введен почти два века назад, когда в 1819 г. Штроемейером был описан новый минеральный вид из образцов щелочного массива Илимаусак (Гренландия). С тех пор интерес к эвдиалиту не ослабевает, поскольку он образует гигантские месторождения, богатые Zr, Ti и рядом других довольно редких, необходимых для техники элементов. В последние годы название «эвдиалит» трансформировано в таксон более высокого ранга, объединяющий быстро пополняемую новыми видами группу минералов. Эвдиалит и его аналоги отличаются уникальным многообразием структур и химического состава. Лишь 30 лет назад под руководством Белова его сложнейшая структура была впервые изучена, и до сегодняшнего дня большая часть исследований минералов этой группы приходится на долю Института кристаллографии.

Идеализированная формула эвдиалита выглядит на первый взгляд просто:

$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Zr}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]_2[\text{Si}_9\text{O}_{27}]_2\text{Fe}_3\text{Cl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Но простота обманчива. Без преувеличения можно сказать, что в эвдиалите содержится треть таблицы Менделеева. Он обладает и уникальным строением: тригональная структура с симметрией  $R3m$ ,  $R-3m$  или  $R3$  содержит три типа колец, из которых два — девятичленное из тетраэдров кремния и шестичленное из октаэдров кальция — столь необычны, что больше не встречены ни в одном минерале.

В полостях каркаса, построенного из атомов кремния, циркония и кальция, локализируются разнообразные по размеру катионы с валентностью от 1 до 6, а также крупные анионы, анионные группировки и молекулы воды. Причем примеси в пустотах цеолитоподобного минера-

ла самоорганизуются и занимают оптимальные положения в каждом образце. Этому способствуют и удивительные особенности структуры, в которой имеются две настоящие ловушки для катионов — треугольная и четырехугольная. Первая находится в центре девятичного кольца  $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$ , имеющего необычную форму: его середина не круглая, а треугольная. Здесь оседают дополнительные Si-тетраэдры, а также октаэдры, чаще всего занятые Nb. Во вторую ловушку попадают катионы со средним радиусом (Fe, Mn, Na и др.), оказывающиеся либо в центре плоского квадрата, либо рядом с ним. Более крупные катионы, а также анионы и молекулы воды заполняют обширные полости.

Чтобы не заблудиться в лабиринтах структуры эвдиалита, Комиссия по новым минералам взяла тайм-аут на два года и провела инвентаризацию видообразующих позиций, обозначив их буквами и снабдив номерами. Согласно разработанной номенклатуре, общая формула эвдиалитов выглядит хотя и устрашающе, но весьма удобно. Буквенные обозначения соответствуют не только набору элементов, но и определенным структурным позициям, каждая из которых может стать видообразующей:

$[A(1)A(2)A(3)A(4)A(5)]_3[M(1,1)M(1,2)]_3[M(2,1)M(2,2)M(2,3)]_{3-6}[M(3)M(4)]Z_3[\text{Si}_{24}\text{O}_{72}]\cdot n\text{H}_2\text{O}\cdot X_{2-4}$ , где  $A = \text{Na}, \text{Ca}, \text{K}, \text{Sr}, \text{REE}, \text{Ba}, \text{Mn}, \text{H}_3\text{O}$ ;  $M(1,1), M(1,2) = \text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE}, \text{Na}, \text{Sr}, \text{Fe}$ ;  $M(2,1) = \text{Fe}, \text{Na}, \text{Zr}, \text{Ta}$ ;  $M(2,2), M(2,3) = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Zr}, \text{Ti}, \text{Na}, \text{K}, \text{Ba}, \text{H}_3\text{O}$ ;  $M(3), M(4) = \text{Si}, \text{Nb}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{W}, \text{Na}$ ;  $Z = \text{Zr}, \text{Ti}$ ;  $X = \text{H}_2\text{O}, \text{Cl}, \text{F}, \text{OH}, \text{CO}_3, \text{SO}_4, \text{SiO}_4$ .

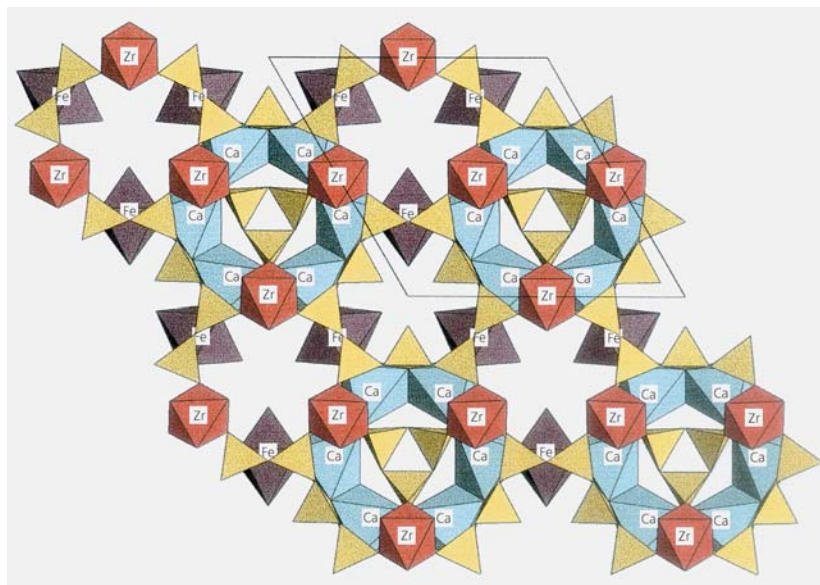
Теоретически легко себе представить, какое количество индивидов можно получить, перебирая состав в каждой из позиций! Проблема, однако, в том, что минералы еще нужно найти. Пока их число чуть больше десятка. Среди них — икранит и расцветаевит, утвержденные в марте текущего года.

### Икранит

$(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{15}(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE})_6\text{Fe}^{3+}_2\text{Zr}_3$   
 $(\square, \text{Zr})(\square, \text{Si})\text{Si}_{24}\text{O}_{66}(\text{O}, \text{OH})_6\text{Cl}n\text{H}_2\text{O}$ ,  
 $(n=2-3)$  найден Чукановым в  
 лопаритовом руднике горы Кар-  
 насурт. Он образует прозрачные  
 желтые и буро-желтые зерна  
 табличчатой формы размером  
 до  $2 \times 1 \text{ см}^2$ , по краям кристаллы  
 нередко окрашены в буро-  
 красный и даже фиолетово-  
 красный цвет. Хрупкий, плотность  
 $2.82 \text{ г/см}^3$ . Параметры его  
 тригональной ячейки традици-  
 онны для статистически разупо-  
 рядоченных образцов эвдиалита:  
 $a=14.167$ ,  $c=30.081 \text{ \AA}$ , симмет-  
 рия  $R\bar{3}m$ .

Главная особенность состава  
 и строения — недозагружен-  
 ность треугольной ловушки мел-  
 кими и средними катионами [14].  
 Поэтому характерные для других  
 эвдиалитов дисковидные анион-  
 ные радикалы превращаются  
 в истинные кольца  $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$ , а сам  
 икранит становится уникальным,  
 чисто кольцевым представи-  
 телем группы. Вторая особен-  
 ность связана с четырехугольной  
 ловушкой, в которой находится  
 октаэдр трехвалентного желе-  
 за — вместо характерного для эв-  
 диалитов двухвалентного в плос-  
 кой четверной координации.

Как ни старались члены вы-  
 шеупомянутой комиссии навес-  
 ти порядок в эвдиалитах, мине-  
 рал преподнес новые сюрпризы.  
 После утверждения номенклату-  
 ры стало ясно, что комиссией  
 не учтено возможное удвоение  
 ячейки, а значит, удвоение  
 и числа судьбоносных позиций.  
 Число катионных позиций, ко-  
 торые теперь нужно принимать  
 во внимание, не 13, а 26. И таких  
 мегаэвдиалитов оказалось нема-  
 ло. В Ловозерском и Хибинском  
 щелочных массивах Хомьяков  
 открыл целое семейство мине-  
 ралов с предельно упорядочен-  
 ными кристаллическими струк-  
 турами. В том числе расцветае-  
 вит, названный в честь автора  
 этой статьи, работающего в Ин-  
 ституте без малого 40 лет,  
 за вклад в структурную минера-  
 логия, в частности в структур-  
 ную минералогия эвдиалитов.

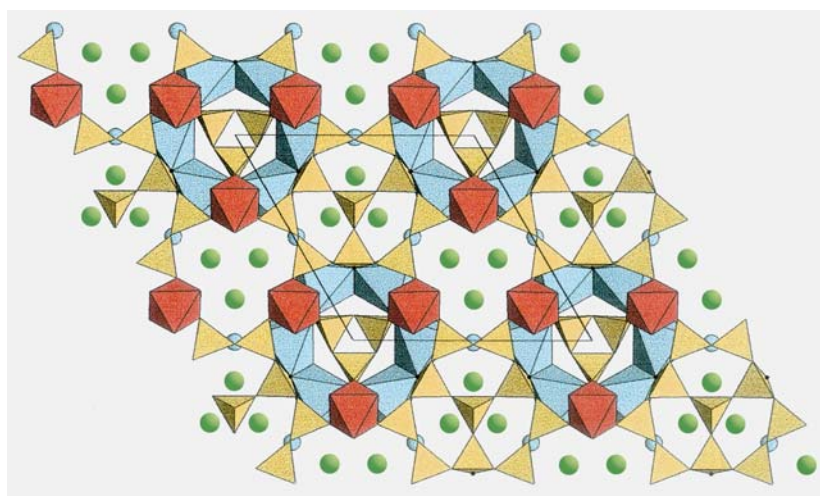


Каркас структуры икранита, составленный из трех типов кольцевых  
 фрагментов: девятых колец  $[\text{Si}_9\text{O}_{27}]$ , тройных колец  $[\text{Si}_3\text{O}_9]$   
 и шестерных колец Ca, O-октаэдров. Шестерные кольца объединяются  
 $\text{Fe}^{3+}$ -октаэдрами. (Положение атомов Na не показано, чтобы  
 не перегружать рисунок.)

### Расцветаевит

$\text{Na}_{27}\text{K}_8\text{Ca}_{12}\text{Fe}_3\text{Zr}_6\text{Si}_{52}\text{O}_{144}(\text{O}, \text{OH},$   
 $\text{H}_2\text{O})_6\text{Cl}_2$   
 обнаружен на горе Расвумчорр  
 Хибинского массива в интен-  
 сивно минерализованных поро-  
 дах ультраагпаитового типа в

виде прозрачных ярко-розовых  
 кристаллов до 2 мм в попереч-  
 нике со стекляннным блеском.  
 Особенность его состава — в су-  
 щественно повышенном содер-  
 жании калия (6.12 мас.%  $\text{K}_2\text{O}$   
 против обычных в эвдиалитах



Структура расцветаевита. Каркас составлен из тройных колец  $[\text{Si}_3\text{O}_9]$ ,  
 шестерных колец Ca, O-октаэдров и дисковидных радикалов  $[\text{Si}_{10}\text{O}_{28}]$ .  
 Шестерные кольца объединяются атомами Na (голубые шары)  
 в квадратной координации (второй модуль с атомами  $\text{Fe}^{2+}$  вместо Na  
 не показан). Крупные зеленые шары — атомы Fe.



и пониженном — железа (2.73% FeO против обычных 5—7%). Структура расцветаевита [15] двухэтажная. параметры тригональной ячейки:  $a=14.25$ ,  $c=60.97$  Å (~30.5×2). Минерал словно состоит из двух разных эвдиалитов. Такие структуры называют модулярными. На одном этаже (или модуле) в квадратной ловушке находятся атомы Fe, что типично для эвдиалитов, а на другом — Na, присущий минералам группы аллуайвита. Большая часть атомов натрия в А-позициях замещена на более крупные атомы калия, которые в ряде позиций доминируют над натрием. Треугольные ловушки в обоих модулях заняты главным образом кремниевыми тетраэдрами, вследствие чего икранитовые девятёрные кольца [Si<sub>9</sub>O<sub>27</sub>] превратились в дискообразные радикалы [Si<sub>10</sub>O<sub>28</sub>].

Открытие расцветаевита, как и других модулярных эвдиалитов, свидетельствует о специфике условий их образования в породах, пересыщенных щелочами и летучими элементами, которые обеспечивают существенное снижение температуры

и расширение временного интервала кристаллизации.

## Вместо послесловия

Краткий очерк о минералах, имена которых связаны с историей Института кристаллографии, позволяет задуматься о проблемах, имеющих отношение к открытию новых природных соединений.

Сегодня в нашей стране принято делить науку на ту, которая кормит, и на ту, которую нельзя продать (т.е. «чистые» исследования). К разряду неприбыльных занятий относится и открытие новых видов. Те, кто открывает новые минералы, и те, чьи имена им присваивают, не имеют никакой выгоды, кроме морального удовлетворения. Вместе с тем мир новых минералов — мир новых знаний об окружающей нас природе, что само по себе уже немало. А кто может сказать, какие из этих знаний пригодятся завтра? К примеру, совсем недавно в связи с поиском новых микропористых материалов ученые обратились к цеолитоподобной группе лабунцовита.

Выяснилось, что одни лабунцовиты лучше поглощают из растворов натрия, калий, цезий, а другие — стронций. И объяснение этому кроется в деталях структуры, установленных рентгеноструктурным анализом. Другой пример — группа эвдиалита. Сегодня разрабатываются новые технологические приемы извлечения полезных компонентов из этих соединений без разрушения их структуры, а также рассматриваются возможности использования декатионированных форм для внедрения и удержания в них вредных для здоровья человека элементов. И опять рентгеноструктурный анализ дает необходимую информацию для разработки оптимальных технологий, основанных на кристаллохимическом подходе.

И хочется надеяться, что Институт кристаллографии, несмотря на трудные для науки времена, и впредь будет поддерживать среди приоритетных направлений минералогические исследования, а значит, коллекция минералов, названных именами его сотрудников, будет пополняться. ■

## Литература

1. Нефедов Е.И. // Геология. 1955. №4. С.528—530.
2. Стишов С.М. // Химия и жизнь. 1991. №4. С.41—49; №5. С.35—42.
3. Стишов С.М., Попова С.В. // Геохимия. 1961. №10. С.837—839.
4. Сбао Е.С.Т., Fabey J.J., Littler J. et al. // J. Geophys. Res. 1962. V.67. №1. P.419—421.
5. Бородин Л.С., Казакова М.Е. // Докл. АН СССР. 1954. Т.96. №3. С.613—616.
6. Хомяков А.П., Лисицын Д.В., Куликова И.М., Расцветаева Р.К. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1996. №5. С.83—94.
7. Клевцова Р.Ф., Борисов С.В. // Журн. структур. химии. 1964. Т.5. №2. С.151—153.
8. Расцветаева Р.К., Хомяков А.П. // ДАН. 1996. Т.349. №3. С.354—357.
9. Пеков И.В., Куликова И.М., Кабалов Ю.К. и др. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1996. №3. С.101—109.
10. Хомяков А.П., Нечелюстов Г.Н., Расцветаева Р.К., Дорохова Г.И. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 1999. №5. С.54—63.
11. Расцветаева Р.К., Аракчеева А.В., Хомяков А.П. // ДАН. 1996. Т.351. №2. С.207—211.
12. Чуканов Н.В., Пеков И.В., Расцветаева Р.К. и др. // Зап. Всероссийского минерал. об-ва. 2001. №3. С.36—43.
13. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Пеков И.В. // ДАН. 1997. Т.357. №1. С.64—67.
14. Екименкова И.А., Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В. // ДАН. 2000. Т.371. №5. С.625—628.
15. Расцветаева Р.К., Хомяков А.П. // Кристаллография. 2001. Т.46. №4. С.715—721.

## Космические исследования

### Новая цель для зонда «Rosetta»

Созданный специалистами Европейского космического агентства автоматический межпланетный аппарат «Rosetta» поначалу был предназначен для запуска к комете Виртанена, намечавшегося на август 2003 г. Однако последние неудачи с ракетами-носителями типа «Ariane-5» заставили отказаться от этой идеи, ставившей под угрозу весь проект, обошедшийся в 1 млрд долл. США.

Теперь по предложению научного руководителя проекта Г.Швема (G.Schwehm; Европейский центр космической технологии в Нордвике, Нидерланды) зонду «Rosetta» предстоит иная судьба — в феврале 2004 г. направиться к комете Чурюмова—Герасименко, открытой этими украинскими астрономами в 1969 г. Исследователи надеются, что к тому времени ракета «Ariane-5» станет более надежным средством запуска аппарата.

Комета Чурюмова—Герасименко обращается вокруг Солнца с периодом около 6,6 лет. В последний раз она посетила внутреннюю область Солнечной системы в августе 2002 г. Встреча зонда «Rosetta» с этой новой целью намечена на конец 2014 г. Как и комета Виртанена, она представляет собой сравнительно небольшое и не слишком активное небесное тело; мягкая посадка спускаемого аппарата на покрытую льдом его поверхность не должна вызвать особых трудностей.

Однако следует учесть, что комета Чурюмова—Герасименко несколько крупнее кометы Виртанена, так что ее тяготение сильнее, в связи с чем необходимо внести некоторые поправки в программу полета. Идея воспользоваться для запу-

ска надежной российской ракетой типа «Протон» отпала, так как западноевропейские специалисты не успевали вовремя внести соответствующие переделки в свой аппарат.

Science. 2003. V.299. №5613. P.1636 (США).

## Экология

### Муравьи-вселенцы угрожают крабам

Австралия не раз страдала от животных-вселенцев. Теперь беда пришла на о.Рождества, расположенный примерно в тысяче километров от ее северо-западных берегов, в восточной части Индийского океана. На этот небольшой остров, площадью 156 км<sup>2</sup>, случайно были завезены африканские желтые муравьи (*Anoplolepis gracilipes*) размером в 1 см. Быстро размножившись (сейчас их численность оценивается в несколько миллионов), они стали серьезной угрозой для местных крабов. Менее чем за 15 лет от агрессивных муравьев погибло около 20 млн крабов: ослепленные струями муравьиной кислоты, они теряют способность к передвижению и поиску пищи.

Terre Sauvage. 2003. №183. P.18 (Франция).

## Биомеханика

### Ход слона

Дж.Хатчинсон (J.Hutchinson; Лаборатория нейромышечной биомеханики Станфордского университета, США), проведя серию наблюдений за движениями ног слона, пришел к предварительному заключению: слоны способны совершать спринтерские забеги со скоростью 24 км/ч, но при этом они... не бегут. Хатчинсон осмотрел и пометил красками суставы ног у 42 тайландских слонов, а затем сделал видеозапись 188 последовательных движений их

ног на 30-метровой дистанции, которую слоны преодолевали на различных скоростях. Анализ видеозаписи показал, что даже на максимальной скорости слоны не бежали.

Как известно, у четвероногих различают три вида шага: на малой скорости (поочередно одна нога выносится вперед, затем другая); на средней, рысью (ноги касаются земли по диагонали); на максимальной, галопом (задние ноги выдвигаются вперед, затем передние, при этом животное на мгновение как бы зависает над землей). Слон же никогда не теряет контакта с землей. При несложном хождении он делает раскачивающиеся движения, а при быстром — пружинящие, подгибая при этом коленные суставы. Для окончательных выводов исследователь намерен провести опыты на специальной платформе.

Sciences et Avnir. 2003. №675. P.50 (Франция).

## Организация науки. Археология

### Пещерное искусство пришло в Интернет

В Интернете появился сайт ([www.europreart.net](http://www.europreart.net)), на котором можно увидеть более 800 наскальных изображений, найденных на территории семи стран Европы и относящихся к ранним этапам человеческой культуры (каменному, бронзовому и железному векам).

Сведения, рассеянные зачастую по малодоступным источникам, теперь собраны воедино. В коллекцию вошли не только наиболее знаменитые (французские и испанские), но и малоизвестные петроглифы, их сопровождают комментарии специалистов с интерпретацией изображений и соответствующая библиография.

Science. 2002. V.298. №5595. P.929 (США).

# Вибрация «изменяет законы механики»



И.И.Блехман

**А**втор не собирается утверждать, будто вибрирующие тела следуют иным законам, нежели законы механики, сформулированные великим Ньютоном. Речь пойдет об удобном физическом истолковании и математическом описании ряда удивительных, зачастую парадоксальных явлений, которые сопровождают действие вибрации на нелинейные механические системы.

Можно ли оставаться равнодушным, видя, как в результате едва заметной вибрации верхнее положение маятника делается устойчивым, тяжелый металлический шар «всплывает» в слое песка, свая легко погружается в грунт под действием собственного веса, массивное тело или слой сыпучего материала движется вверх по наклонной плоскости, вращение ротора устойчиво поддерживается при выключенном электродвигателе и т.п.? Часто (и, как мы увидим, не без оснований) создается впечатление, будто сила тяжести изменила свое направление, известное положение о невозможности ускорить или замедлить движение центра масс системы только за счет внутренних сил перестало действовать, закон механики о равенстве действия и противодействия нарушился,



***Илья Израилевич Блехман**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вибрационной механики Института проблем машиноведения РАН и ОАО «Механобр-Техника» (Санкт-Петербург). Область научных интересов — прикладная математика и механика, нелинейная динамика, теория колебаний, вибрационная техника и технология. Основал и развил ряд новых направлений, в частности теорию вибрационного перемещения, теорию синхронизации вращающихся тел, вибрационную механику.*

существенно неконсервативная система ведет себя как консервативная и т.д.

Неудивительно, что перечисленные эффекты не раз служили поводом для заблуждений, в том числе для «ниспровержения» законов механики. Справедливости ради надо, однако, отметить: иногда такие «ниспровергатели» попутно делали остроумные и полезные изобретения и стимулировали интересные исследования (точно так же, как и их предшественники — изобретатели «вечных двигателей»).

## Колебания вокруг нас

Колебательные процессы характерны для всей живой и неживой природы — от клетки до сообществ организмов и от атома до галактик. Они играют заметную роль и в нервно-психической жизни человека, и даже в сфере социальных явлений. Вопрос о том, почему природа часто «предпочитает» колебания монотонному течению процессов, до сих пор не имеет общего ответа. Только в ряде конкретных случаев

можно догадаться, что колебательные процессы характеризуются определенной целесообразностью, а иногда и оптимальностью.

*Вибрация* — один из видов колебательных процессов. Под нею понимают механические колебания с периодом, значительно меньшим промежутка времени, на котором рассматривается движение системы, и амплитудой, значительно меньшей характерного размера системы.

Долгое время вибрация рассматривалась в основном как вредный фактор — причина поломок, аварий, а также производственных заболеваний. И лишь в начале прошлого столетия берет отсчет период бурного развития вибрационной техники, без которой сейчас немыслим ряд важных производств при добыче и переработке полезных ископаемых, в химической технологии, в металлургии, в промышленности строительных материалов и при строительстве различных сооружений. Впрочем, отдельные примеры использования вибрации известны с очень давних времен, когда она применялась при просеивании сыпучих материалов, при строительных работах и даже в медицинской практике.

Кратко перечисленные выше (и более подробно — рассматриваемые ниже) вибрационные эффекты как раз и лежат в основе принципов действия ряда высокоэффективных машин; с другой стороны, те же эффекты могут стать причиной нежелательных и даже катастрофических ситуаций.

Их существенная черта — нелинейный характер: результаты действия двух или нескольких факторов не складываются, а комбинируются, порой достаточно сложным, неожиданным образом (пример: результат одновременного приема двух хороших по отдельности лекарств может быть плохим).

## О вибрационной механике

Для большинства случаев характерно, что возникающее в системе под действием вибрации движение  $x$  естественно представляется в виде суммы двух составляющих — медленной  $X$ , мало изменяющейся за один период колебаний, и быстрой, «вибрационной»  $\psi$ , причем обычно основной интерес представляет именно медленное движение (рис.1). Вообразим наблюдателя, не замечающего (или не желающего замечать) ни этих быстрых (как правило, малых) движений, ни быстрых сил, т.е. наблюдателя, который либо надел особые очки (сквозь них не видны быстрые движения системы), либо следит за движением при стробоскопическом освещении с частотой вспышек, равной частоте вибрации. Такой наблюдатель  $V$ , в отличие от обычного наблюдателя

$O$ , который «все видит», будет регистрировать лишь медленную составляющую движения  $X$ . Не желая вступать в противоречия с законами механики, он должен будет объяснить упомянутые парадоксальные эффекты тем, что наряду с обычными медленными силами начали действовать некоторые дополнительные медленные силы или моменты  $V$ . Следуя П.Л.Капице, будем называть их *вибрационными силами*. Именно эти силы с точки зрения такого «необъективного» наблюдателя и приводят к перечисленным выше эффектам.

Рассматривая соответствующие дифференциальные уравнения движения, можно прийти к положению, аналогичному известной теореме механики относительного движения. Согласно этой теореме, наблюдатель, связанный с ускоренно движущейся системой координат, должен ко всем действующим

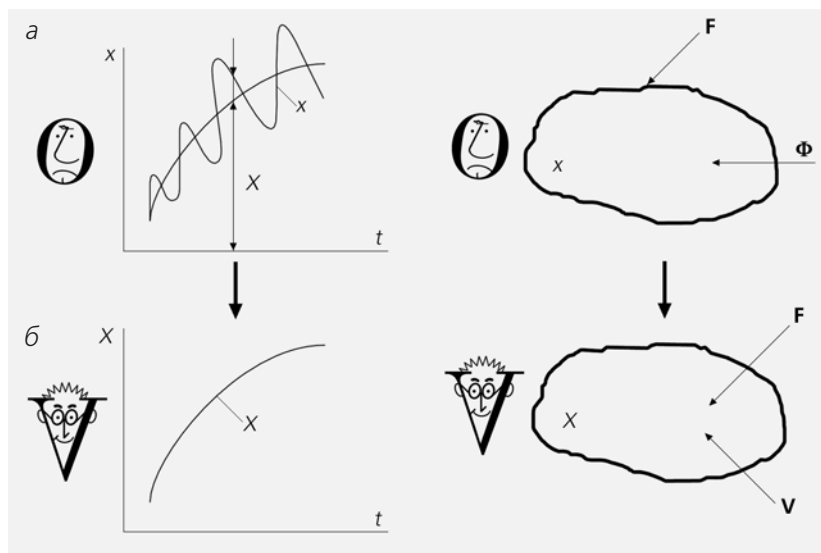


Рис. 1. «Мир» наблюдателей  $O$  и  $V$ . Наблюдатель  $O$  видит реальный процесс  $x$ , а наблюдатель  $V$  — только его медленную (среднюю) составляющую  $X$  (а). Наблюдатель  $O$  видит систему, на которую действуют медленные силы  $F$  и быстрые  $\Phi$ , а наблюдатель  $V$  видит только систему, находящуюся под действием медленных сил  $F$  и  $V$  (б). Здесь и ниже наблюдатель  $O$  изображен печальным ( $\ominus$ ), а наблюдатель  $V$  — веселым ( $\nabla$ ). Этим подчеркивается, что мир наблюдателя  $V$ , который он видит через свои очки, гораздо проще, чем мир наблюдателя  $O$ . Значительно проще и соответствующие дифференциальные уравнения вибрационной механики.

щим на систему обычным силам добавить силы инерции. В нашем же случае наблюдатель  $V$ , не замечающий ни быстрых сил, ни быстрых движений, обязан добавить ко всем обычным силам вибрационные силы. Если в механике относительного движения введение сил инерции — своего рода штраф за использование неинерциальной системы отсчета, то добавление вибрационных сил представляет собой штраф за игнорирование быстрых (как правило, малых) движений системы.

Учитывая сказанное, будем называть механику, которой должен руководствоваться наблюдатель, не замечающий быстрых сил и быстрых движений (наблюдатель  $V$ ), *вибрационной механикой* [1, 2].

Одна из основных задач в вибрационной механике — о нахождении выражений для вибрационных сил. Эта задача достаточно эффективно решается в рамках разработанной теории.

Вибрационная механика — новый раздел механики и теории нелинейных колебаний, который интенсивно развивается учеными России, Украины, Германии, Дании и других стран. Она служит, в частности, теоретической основой вибрационной техники и технологии. Возникла в нашей стране эта дисциплина не на пустом месте. Она базируется на фундаментальных исследованиях в области теории нелинейных колебаний и устойчивости движения, в которых отечественная школа физиков, математиков и механиков сыграла (и до сих пор играет) выдающуюся роль. Речь идет о трудах А.М.Ляпунова, Л.И.Мандельштама, Н.Д.Папалекси, А.А.Андропова, А.А.Витта, Н.М.Крылова, Н.Н.Боголюбова, Н.Г.Четаева, И.Г.Малкина, Б.В.Булгакова, А.И.Лурье и многих других, в том числе ныне здравствующих ученых. Автор этих строк не раз слышал на банкетах слова иностранных ученых: «Теория нелинейных колебаний — советская выдум-

ка». В каждой шутке есть доля правды (а в данном случае — большая доля!).

## Немного истории

Толчком к развитию вибрационной механики послужила работа П.Л.Капицы, опубликованная в 1951 г. Будучи тогда молодым, начинающим ученым, я восхищался тем, как просто, изящно и физически прозрачно — путем прямого разделения медленного и быстрого движений — в задаче о маятнике с вибрирующей осью подвеса получены яркий результат: устойчивость верхнего положения маятника и найдено соответствующее условие устойчивости (рис.2). В те годы многие видные ученые, преимущественно математики, придерживались мнения, что этот результат, полученный нестрогим путем, не имеет достаточно общего значения. Поэтому в своих диссертационных работах, посвященных теории самосинхронизации вращающихся тел и теории вибрационного перемещения, я предпочел пользоваться методами Пуанкаре—Ляпунова и, где это было возможно, — точными методами.

Каково же было мое удивление, когда оказалось, что те же результаты, найденные путем достаточно трудоемкого исследования, легко получаются посредством приемов (строго не обоснованных!), обобщающих прием Капицы для более сложных систем. Появились и работы других авторов, применивших его подход к решению ряда прикладных задач (отметим в их числе С.С.Духина, М.П.Юшкова, К.М.Рагульскаса, С.М.Зеньковской). Стало очевидно, что успех не случаен. И автор поставил перед собой задачу — распространить прием Капицы на достаточно общие нелинейные системы и по возможности математически обосновать его в духе асимптотических методов нелинейной механики. Это привело,

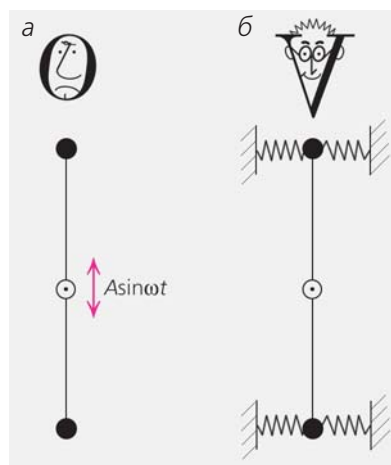


Рис.2. Маятник, точка подвеса которого совершает колебания по закону  $Asin\omega t$ . Здесь и далее цветные стрелки показывают направление вибрации. Верхнее положение маятника может стать устойчивым вследствие вибрации его оси (а). Наблюдатель  $V$  считает это результатом того, что маятник подпирается в обоих положениях равновесия незримыми пружинами (б). Наличием пружин объясняется тот факт, что маятниковые часы на вибрирующем основании всегда спешат (тогда как песочные часы в этом случае всегда отстают).

во-первых, к решению ряда сложных и важных для приложений задач о действии вибрации на нелинейные системы — в диапазоне от теории механизмов и машин до небесной механики. Во-вторых, был математически формализован аппарат метода. Наконец, в-третьих, сформировались концепции, названные автором вибрационной механикой и виброреологией. Было установлено, что они представляют собой частные случаи более общей концепции — механики систем со скрытыми (игнорируемыми) движениями.

К сожалению, практически во всех обзорах блестящей деятельности академика Капицы не отмечается значение его работы о маятнике в развитии и становлении нового эффективного ме-

тогда и нового раздела теории нелинейных колебаний. Воистину справедливо известное изречение о том, что талант точно поражает намеченную цель, а гений одновременно поражает и многие другие цели!

### Когда кпд машины «больше» единицы, а килограмм ваты «тяжелее» килограмма стали

Подобные эффекты, невозможные для наблюдателя О, представляются реальными для наблюдателя V, не замечающего быстрых движений. Так, если электродвигатель с неуравновешенным ротором находится на вибрирующем основании (рис.3,а), вибрация может тормозить его вращение, т.е. служит дополнительной нагрузкой. Однако при других условиях эта вибрация подталкивает ротор, давая дополнительный вращающий момент. Подталкивание может быть столь значительным, что ротор будет вращаться, даже если двигатель выключен из сети (см. далее раздел о самосинхронизации). Наблюдатель V, не замечающий вибрацию, скажет, что кпд двигателя в этом последнем случае увеличился и, быть может, превысил единицу. Описанный эффект получил название *вибрационного поддержания вращения*. Он же позволяет играть в хула-хуп (рис.3,б). Примечательно, что мощность, которую способна передать вибрация вращающемуся ротору, может быть весьма велика. Именно это обстоятельство позволило создать в институте «Механобр» принципиально новые машины — конусные инерционные дробилки (рис.3,в) [1–3].

А вот два примера вибрационного торможения из практики. В первом случае судовая машина упорно не выходила на номинальные обороты. После долгих расследований выяснилось, что причиной «отсоса» энергии были интенсивные ре-

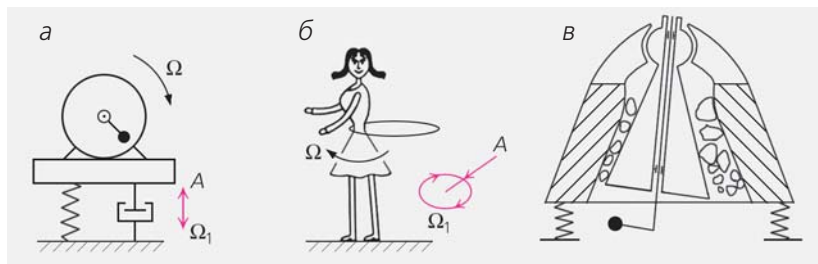


Рис.3. Влияние вибрации на вращение ротора. Измеряемый кпд вследствие вибрации может оказаться как меньше, так и больше действительного значения (измеренного на неподвижном основании) и даже больше единицы! (а). Игра-упражнение хула-хуп (б) и инерционная дробилка института «Механобр» (в) — примеры использования эффекта вибрационного поддержания вращения (роль обруча в дробилке играет корпус).

зонансные колебания троса, лежавшего на палубе. Во втором случае тормозился локомотив, ведущий состав с жидким грузом: здесь энергия тратилась на возбуждение колебаний жидкости, частично заполняющей цистерны.

Все описанные выше эффекты могут быть объяснены как результат появления в уравнении вибрационной механики вибрационной силы (или момента)  $V$ .

Рассмотрим теперь чувствительные весы, схематически изображенные на рис.4,а. Коробочка, в которую помещена муха, в точности уравновешена гирькой, лежащей на другой чашке весов. Изменится ли равновесие, если муха станет летать внутри коробочки? Автору эта задача была предложена на экзамене в институте, и он дал ожидаемый экзаменатором ответ: не изменится, поскольку внутренние силы, возникающие при

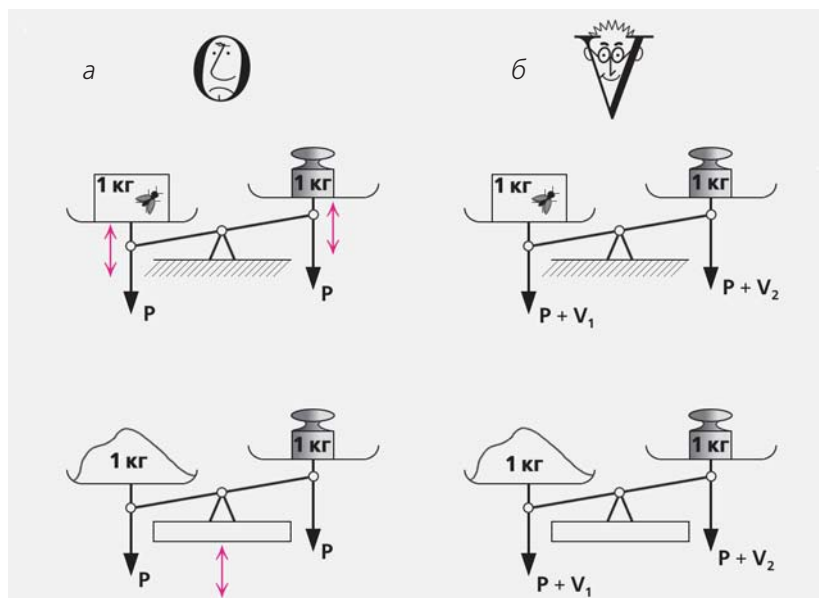


Рис.4. Нарушение равновесия чашек чувствительных весов вследствие вибрации: картины, видимые наблюдателем О (а) и V (б).  $P$  — вес чаши весов с грузом.

полете мухи, не могут изменить момента количества движения данной системы. И это действительно так, если не учитывать наличия внешней силы — сопротивления воздуха движению чашек весов — или допустить, что весы помещены в вакуум. Если же не делать такого допущения, то равновесие может измениться! Это произойдет вследствие «аэродинамической асимметрии» системы: естественно предположить, что сопротивление воздуха движению чашек, во-первых, неодинаково при движении вверх и вниз, а во-вторых, неодинаково для обеих чашек по-разному. Тогда при колебаниях чашек весов вблизи положения равновесия, вызванных полетом мухи, средняя сила  $V_1$ , действующая на левую чашку (т.е. вибрационная сила), будет отличаться от такой же силы  $V_2$ , действующей на правую чашку.

Снова рассмотрим те же весы с уравновешенным гирькой грузом, но теперь заставим вибрировать в вертикальном направлении основание, на котором они стоят (рис.4,б). Равновесие может измениться по тем же причинам, что в предыдущем случае. Автору известен эпизод, когда наблюдение за подобной системой привело экспериментатора к мысли, что вибрация изменяет вес тела.

## Вибрационное перемещение — полезное и вредное

Под эффектом *вибрационного перемещения* понимается возникновение направленного в среднем изменения (в частности — движения) за счет ненаправленных в среднем (колебательных) воздействий. На нем основаны: транспортирование отдельных тел и сыпучих материалов в вибрирующих лотках и сосудах; работа устройств, называемых вибрационными преобразователями движения и вибродвигателями; погружение свай, шпунта и оболочек, а также

разделение частиц сыпучего материала по плотности, размерам и некоторым другим параметрам за счет вибрации; движение вибрационных экипажей; полет и плавание живых организмов. В качестве примера вредного проявления этого эффекта можно указать возникновение под действием вибрации подвижности номинально неподвижных деталей машин (в частности — самоотвинчивание гаек) [1–6].

В последние годы либо по незнанию предшествующих работ, либо по другим менее прощательным причинам ряд авторов присваивает тем же эффектам иные названия: «речет», «прогрессивное движение» и т.п. Первое в переводе с английского означает храповик — стопорящееся при вращении в одном из направлений колесо с наклонными зубцами, используемое, например, в механизме часов. С помощью храповика колебания маятника или балансира преобразуются в направленное движение часовых стрелок.

В литературе встречаются и сомнения в возможности получения направленного движения путем колебательных (в том числе случайных) воздействий. Это, якобы, противоречит второму началу термодинамики. Такие сомнения безосновательны. В общей форме ответ состоит в следующем: для получения вибрационного перемещения необходима та или иная асимметрия системы. Можно различать шесть основных видов асимметрии: силовую, кинема-

тическую, структурную (конструктивную), градиентную, волновую и начальную (т.е. связанную с начальными условиями движения). Характер каждого вида асимметрии частично ясен из его названия; развернутые определения можно найти в книгах [1, 2]. Разумеется, возможно сочетание сразу нескольких, например, двух видов асимметрии.

Вибрационное перемещение (транспортирование) во всех перечисленных случаях можно трактовать в рамках вибрационной механики: наблюдателю  $V$  представляется, что оно происходит под действием некоторой вибрационной силы  $V$ .

Вот как работает техника, основанная на эффектах виброперемещения. На рис.5,а схематически изображено устройство для вибрационного транспортирования сыпучей среды. Под действием вибрации лотка материал поступает на него из бункера и транспортируется влево. На рис.5,б представлен противоположный процесс — вибробункеризация. В этом случае под действием иным образом ориентированной вибрации лотка бункер заполняется поступающим оттуда материалом. В рамках вибрационной механики оба процесса естественно объясняются появлением вибрационных напряжений  $\tau_v$ , распределенных по поверхности лотка.

На рис.6 дана схема вибрационного устройства для заполнения порошком тонкой метал-

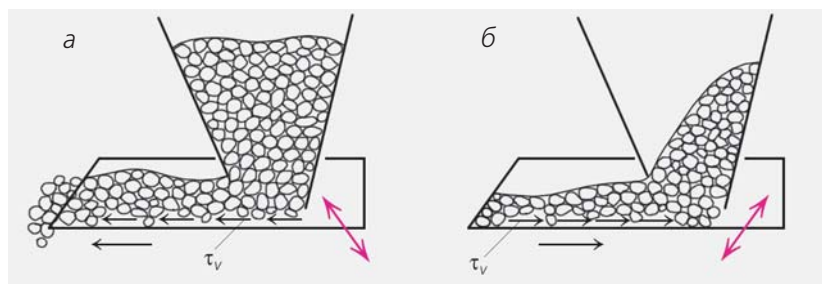


Рис.5. Вибрационное истечение и вибрационное транспортирование сыпучего материала (а) и заполнение бункера сыпучим материалом (вибробункеризация) (б).  $\tau_v$  — вибрационное напряжение.

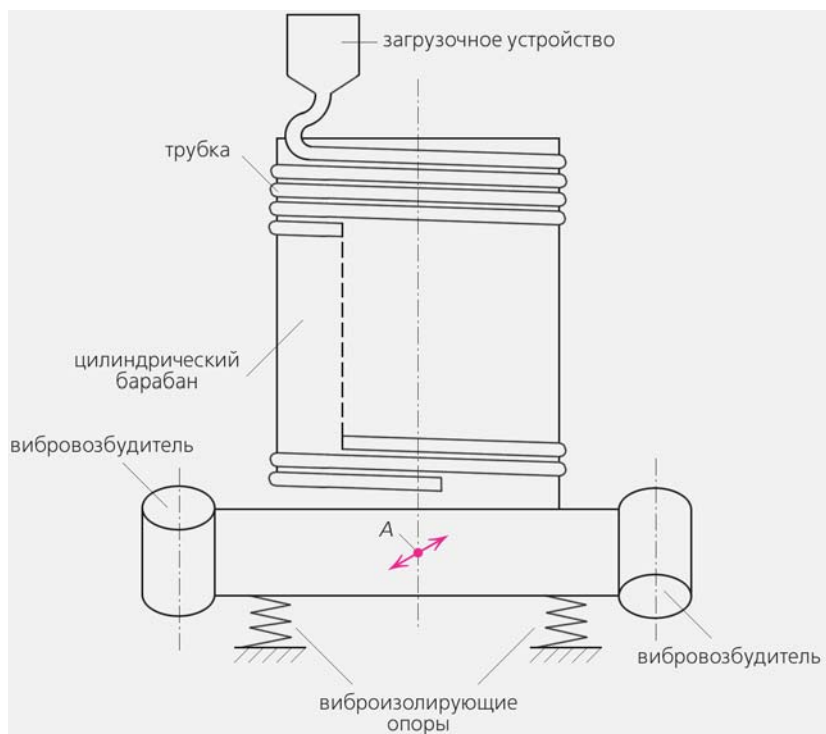


Рис.6. Схема устройства для заполнения порошком тонкой металлической трубки.

лической трубки, что необходимо при изготовлении электродной проволоки. Устройство обеспечивает равномерное и плотное заполнение порошком трубки диаметром 3–7 мм и длиной до 500 м. Это пример технологической задачи, которая вряд ли могла быть эффективно решена без использования вибрации. В описываемом

устройстве трубка наматывается на вертикальный цилиндрический барабан и закрывается снизу. Барабану сообщаются винтовые колебания. Подаваемый сверху порошок заполняет трубку. Как и по отношению к ряду других вибротранспортирующих устройств, было бы совершенно недостаточно сказать, что порошок становится

под действием вибрации текучим, подобно жидкости, т.е. имеет место эффект псевдооживления. Не менее важно, что на каждом участке создается вибрационная сила, обеспечивающая «напор» в нужном направлении.

То же самое относится в процессе виброразгрузки сыпучих грузов из железнодорожных вагонов (рис.7). Характер вибраций, сообщаемых вагону, таков, что они не только «разжижают» материал, но и подают его к месту разгрузки.

Приведенными примерами далеко не ограничивается практическое использование эффектов вибрационного перемещения. Машины, основанные на этих эффектах, широко применяются при переработке полезных ископаемых, на предприятиях строительной, химической и пищевой промышленности.

## Можно ли плыть на лодке без весел?

Одно из проявлений эффекта вибрационного перемещения — *вибрационное передвижение*. Под таким будем понимать передвижение тела в некоторой среде или силовом поле, происходящее вследствие периодических движений других тел, связанных с исходным. Устройства или живые организмы, которые передвигаются по этому принципу, будем условно называть *вибрационными экипажами*.

Естественно, что взаимодействие самого устройства (организма) или указанных тел с внешней средой или наличие внешнего поля совершенно необходимо для изменения средней скорости движения центра инерции подобного экипажа, ибо иначе нарушался бы известный закон сохранения импульса. Уже отмечалось, что о наличии внешних сил или полей иногда забывают, и тогда это служит поводом для недоразумений, вплоть до выражения со-

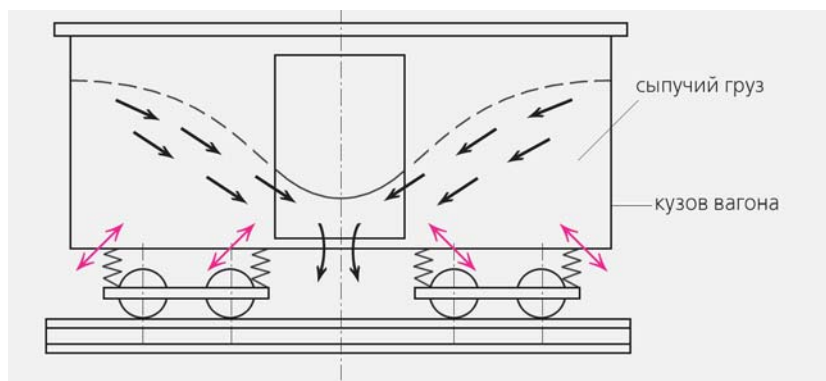


Рис.7. Вибрационная разгрузка железнодорожных вагонов с сыпучими грузами.



мнений в справедливости законов механики.

Не останавливаясь подробно на проблеме передвижения живых организмов, которой посвящена обширная литература, рассмотрим преимущественно вибрационные экипажи, в том числе несколько экзотические.

Заметим прежде всего, что если бы ответ на вопрос, поставленный в заголовке раздела, был отрицательным, автор не задавал бы его читателю. Читатель, конечно, знает, что резкими движениям своего корпуса в одном направлении и плавными — в другом, человек может заставить перемещаться лодку, в которой он находится. Точно так же, резко опуская зонтик и плавно поднимая его вверх (рис.8,а), можно если не подняться в воздух, то заметно «уменьшить свой вес» (а в во-

де — даже и всплыть). Экипажи, основанные на данном принципе, называются *вибролетами*.

Экипаж с рис.8,б, как и предыдущий, характеризуется разным сопротивлением движению вперед  $F_+$  и назад  $F_-$  благодаря наклону жестко связанных с ним плавников. Предполагается, что не показанный на рисунке вибровозбудитель генерирует периодическую вынуждающую силу  $\Phi(\omega t)$  (не обязательно симметричную). Более общая схема рис.8,в отличается от схемы рис.8,б тем, что плавники присоединены к корпусу шарнирно и связаны с ним также упругими элементами некоторой жесткости  $C$ , которая может быть выбрана из условия резонанса плавника с частотой вынуждающей силы  $\omega$ . Естественно, в этом случае экипаж может развивать значительно большую скорость. Именно по этой схеме образует-

ся тяга (и подъемная сила) в летательных аппаратах с машущими крыльями, у насекомых и птиц, а у некоторых организмов — при плавании.

Весьма примечательно, что устройства, подобные изображенному на рис.8,б,в, могут передвигаться и без затрат внутренней энергии, и без внутреннего источника возбуждения. Действительно, предположим, что в них отсутствуют вибровозбудители, т.е.  $\Phi(\omega t)=0$ , но их корпуса систематически испытывают извне случайные толчки, равновероятные во всех направлениях. Продвигнуться вперед этим устройствам благодаря наклонным плавникам легче, чем назад, поскольку  $|F_+| < |F_-|$ . В результате и в данном случае возникает вибрационная сила, которая заставит устройство медленно двигаться вперед. Этот эффект может быть усилен, если выбрать жесткость упругих элементов в устройстве рис.8,в так, чтобы частота их свободных колебаний в жидкости была близка к преимущественной частоте турбулентных пульсаций в водоеме. Есть данные о том, что китообразные могут регулировать жесткость плавников и хвоста, увеличивая или уменьшая приток крови к соответствующим группам мышц. Возможно, эти животные также черпают часть энергии, затрачиваемой на передвижение, из «возобновляемого источника энергии» — турбулентного потока. Известен и иной, волновой, механизм получения животными энергии из потока.

Схема рис.8,г соответствует механизму плавания жгутиковых. Подобные организмы передвигаются в жидкости, придавая своему удлинённому телу или его частям поперечные колебания в виде бегущей волны (волновая асимметрия).

И во всех случаях наблюдатель  $V$  объяснит направленное движение экипажей возникновением вибрационной силы  $V$  (рис.8,д).

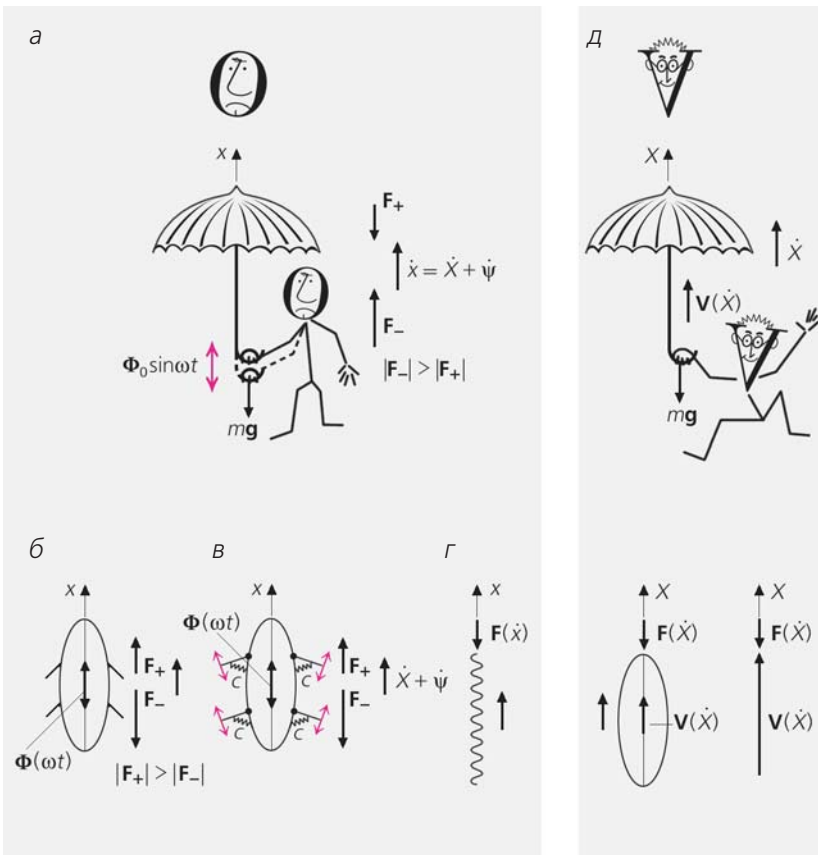


Рис.8. Вибрационные экипажи. Уменьшение веса при взмахах зонтиком ( $mg$  — сила тяжести) и простейшие модели движения живых организмов.

## Притяжение ритмов (самосинхронизация)

Одно из удивительных явлений рассматриваемого класса — *самосинхронизация неуравновешенных роторов* (роторов, ось вращения которых не проходит через центр масс). Оказывается, два или более кинематически и электрически не связанных между собой ротора, установленные на общем подвижном основании и приводимые в движение от независимых асинхронных двигателей, вращаются синхронно — с одинаковыми или кратными средними угловыми скоростями и с определенными взаимными фазами. При этом согласованность вращения роторов возникает, несмотря на различие между их парциальными угловыми скоростями, т.е. теми скоростями, с которыми они вращаются, будучи установленными на неподвижном основании (рис.9). Тенденция к синхронному вращению оказывается во многих случаях столь сильной, что даже выключение одного или нескольких двигателей не приводит к выпадению из синхронизма: роторы с выключенными двигателями могут продолжать вращаться неограниченно долго. Энергия, необходимая для поддержания их вращения, передается от оставшихся включенными в сеть двигателей благодаря вибрации основания, на котором роторы установлены. Эта вибрация может быть едва заметна; у наблюдателя V складывается впечатление, будто между роторами имеются упругие валики или пружины (рис.9,в).

Толчком к обнаружению явления самосинхронизации неуравновешенных роторов как раз и послужило случайное наблюдение описанного эффекта в ленинградском институте «Механообр» в 1948 г. При длительных испытаниях вибрационной машины с двумя механическими вибровозбудителями (неуравновешенными ротора-

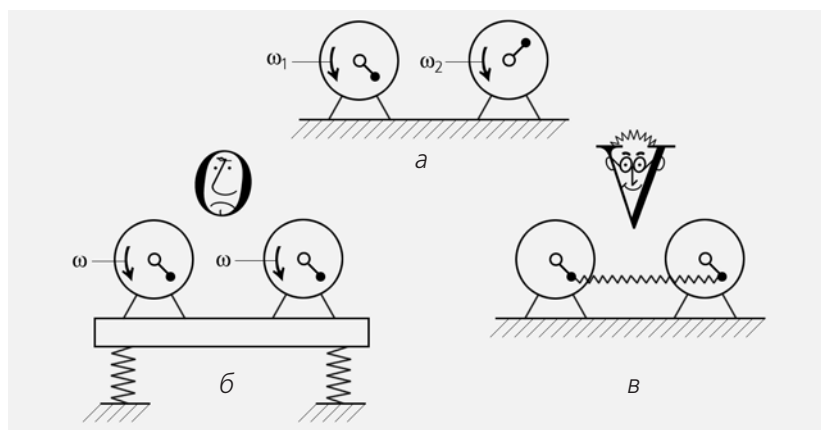


Рис.9. Самосинхронизация механических вибровозбудителей. Два или более неуравновешенных ротора, приводимых в движение асинхронными двигателями, на неподвижном основании имеют разные скорости вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (а). Установленные же на общем подвижном основании, они вращаются с одинаковой средней скоростью  $\omega$  (б). Синхронность вращения может сохраняться даже при выключении одного из двигателей ( $\omega_1=0$  или  $\omega_2=0$ ). У наблюдателя V создается иллюзия, будто роторы соединены пружиной (в).

ми, которые приводились во вращение от асинхронных электродвигателей) оборвался провод, подающий напряжение к одному из двигателей. Наличие обрыва, однако, выяснилось лишь спустя несколько часов, ибо установка продолжала нормально работать.

В том же институте было выполнено и большинство теоретических исследований и экспериментально-конструкторских разработок устройств с самосинхронизирующимися вибровозбудителями. Его сотруднику выдано свидетельство на научное открытие явления синхронизации вращающихся тел (роторов) [1—3, 7].

Раньше вращение неуравновешенных роторов в вибрационных машинах согласовывалось лишь путем установки между ними жестких кинематических связей в виде зубчатых зацеплений, цепных передач и т.п. (см. рис.10,а). Результатом становились значительный шум и быстрый износ, сопровождающий работу зубчатой или цепной передачи — из-за наличия знакопеременных или пульси-

рующих нагрузок. Кроме того, кинематический способ синхронизации сдерживал развитие вибрационной техники, поскольку не мог быть целесообразно применен во многих практически важных случаях, например при значительных расстояниях между вибровозбудителями. При использовании самосинхронизации кинематические связи между роторами оказываются излишними (рис.10,б). Последовавшая вслед за открытием разработка устройств с самосинхронизирующимися вибровозбудителями привела к созданию нового класса вибрационных машин — конвейеров, питателей, грохотов, дробилок, мельниц, концентрационных столов, специальных станков и др. К настоящему времени зарегистрировано около 300 изобретений и патентов, основанных на использовании эффекта самосинхронизации. Многие из этих изобретений, по-видимому, не были бы сделаны без теоретических исследований. Дело в том, что ряд закономерностей самосин-

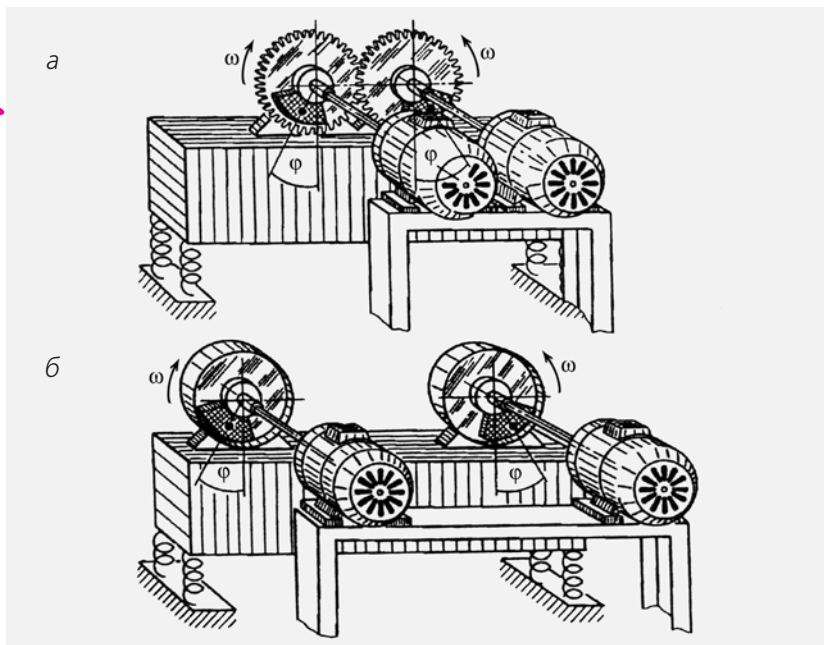


Рис. 10. Возможности использования самосинхронизации роторов: старый способ согласования вращения роторов вибровозбудителей для получения направленных колебаний (а); новый способ достижения той же цели (зубчатое зацепление излишне) (б).

хронизации вибровозбудителей вряд ли может быть предсказан на основе чисто интуитивных соображений или обнаружен на основе нецеленаправленного экспериментирования. Вместе с тем возможности использования самосинхронизации вибровозбудителей еще далеко не исчерпаны — постоянно рождаются новые идеи, разрабатываются новые и совершенствуются известные устройства.

По-видимому, первое наблюдение и описание явления синхронизации колеблющихся объектов принадлежит Х.Гюйгенсу, который еще в начале второй половины XVII в. обнаружил, что пара маятниковых часов, ходивших по-разному, самосинхронизовалась, когда их прикрепляли к легкой балке вместо стены.

В конце 19-го столетия Дж.Рэлей заметил, что две органые трубы с расположенными рядом отверстиями при близкой настройке начинают звучать в унисон, т.е. происходит взаимная синхронизация

колебаний. Иногда при этом трубы могут заставить друг друга почти полностью «замолчать». Аналогичное поведение было обнаружено Рэлеем и у двух электрических или механически связанных камертонов. В конце XIX — начале XX в. были открыты явления синхронизации в электрических цепях и в некоторых электромеханических системах. Взаимная синхронизация электрических генераторов и генераторов электромагнитных колебаний до недавнего времени представляла собой главные технические приложения синхронизации, им посвящено значительное число теоретических и экспериментальных исследований\*.

Самосинхронизация вращения характерна не только для

\* Совсем недавно пришло сообщение о грандиозной аварии — отключении электростанций на восточном побережье США и Канады. Есть основания предполагать, что причиной было (быть может, спровоцированное) выпадение из ритма одной из электростанций и последовавшая цепная реакция.

неуравновешенных роторов, расположенных на единой колебательной системе, но и для многих других вращающихся взаимодействующих тел (в частности, для небесных тел); см., напр., [8], а также [1—3, 7]. Было установлено, что для возникновения тенденции к синхронизации принципиально важно именно наличие сил взаимодействия, зависящих, помимо прочего, от угловых координат тел. При этом синхронизация вращений, сопровождающаяся установлением определенных фазовых соотношений, часто происходит даже при весьма слабых взаимодействиях. В частности, стало понятным, что в случае небесных тел речь, несомненно, идет об общей закономерности — стремлении гравитационно взаимодействующих вращающихся тел к взаимной синхронизации, причем эта тенденция определяется общим для многих классов вращающихся тел механическим принципом — так называемым интегральным критерием устойчивости синхронных движений.

## Самосинхронизация всюду и везде?

Обнаружение синхронизации неуравновешенных роторов и развитие ее теории позволили понять тенденцию к синхронизации как общее свойство материальных объектов различной природы — тенденцию к самоорганизации, противоположную стремлению к хаотическому поведению. По сути дела, возник новый раздел современной нелинейной механики — *теория синхронизации динамических систем*.

Значительный интерес исследователей ныне привлекают проблемы синхронизации в живых системах. Известны эффекты самосинхронизации излучения жучков-светлячков на одной поляне, скандированные аплодисменты большой аудитории, синхронизация менстру-

альных циклов у женщин, проживающих в общежитии. В настоящее время начались многочисленные исследования синхронизации в сообществах клеток и нейронов, в том числе в связи с попытками понять механизмы памяти эмоций. Еще Н. Винер выдвинул гипотезу о синхронизационном механизме роста раковых клеток; эта гипотеза до сих пор не подтверждена и не опровергнута.

Несомненна роль синхронизации в микромире. Изучение таких процессов лишь начинается.

Все сказанное выше относилось к «частотной» или, как иногда говорят, к «гюйгенсово» синхронизации, в частности к самосинхронизации. В последние годы появилось большое число работ, посвященных синхронизации в более широком смысле — как согласованному во времени протеканию или согласованию двух и более процессов. Значительное внимание уделяется проблемам управления синхронизацией и синхронизации хаотических движений.

### Как вибрация превращает песок в «жидкость», а веревку в «стержень»

Важным разделом механики является *реология* — раздел, в котором изучается деформация и текучесть вещества. Классическими моделями реологии служат упругое тело Гука, вязкая жидкость Ньютона, пластическое тело Сен-Венана.

Под *виброреологией* понимается раздел механики, в том числе вибрационной, и реологии, анализирующий изменение под влиянием вибрации реологических реакций тел на медленные силы, а также соответствующие медленные движения тел [1–3]. Иными словами, виброреологию можно определить как реологию для наблюдателя  $V$ .

Когда говорят, что под действием вибрации изменяются свойства сред, в сущности имеют в виду разное их восприятие наблюдателями  $O$  и  $V$ , т.е. изменения свойств, обнаруживаемые путем слежения соответственно за координатами  $x$  и  $X$ . Так, для наблюдателя  $O$  вибрируемый песок остается песком, а для наблюдателя  $V$  — становится подобным жидкости; для инженера естественно именно точка зрения наблюдателя  $V$ .

Следует, однако, отметить, что расхожее утверждение о разжижении сыпучей среды под действием вибрации весьма одномерно: в действительности возникают также поверхностные и объемные вибрационные силы. Именно наличием этих сил объясняются рассмотренные выше эффекты вибротранспортирования и вибробункеризации сыпучей среды. Другое подтверждение их действия — разница уровней среды в сообщающихся вибрирующих сосудах (см. рис.11, на котором представлены два характерных случая).

Особый интерес представляют виброреологические эффекты, состоящие в изменении жесткостных характеристик упругих систем под действием вибрации. По-видимому, первым обратил внимание на такие эффекты академик В.Н.Челомей, указавший на их связь с поведением маятника, имеющего вибрирующую ось (рис.2). Поразительный эффект подобного рода был, однако, известен давно. Речь идет об индийской магической веревке (рис.12). Под влиянием вибрации нижнего конца ее верхнее вертикальное положение становится устойчивым. Веревка «пружинит», принимая это положение, как бы значительно ее ни отклоняли.

Подход вибрационной механики позволяет дать простое и отчетливое физическое объяснение этого эффекта: в результате вибрации веревка приобретает дополнительную изгибную жесткость, зависящую от частоты и амплитуды вибрации  $\Omega$

и  $A$ . Веревка словно превращается в балку. Можно сказать, что, изменяя  $A$  и  $\Omega$ , мы получаем новый материал (рис.13).

Тот же эффект имеет место в случае струны, натяжение которой быстро периодически изменяется. В результате струна приобретает дополнительную «вибрационную» жесткость, превращаясь, как и веревка, в упругий «стержень».

Приведенные примеры могут рассматриваться как предельные частные случаи так называ-

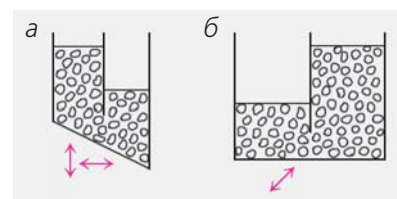


Рис. 11. В сообщающихся вибрирующих сосудах сыпучая среда устанавливается на разных уровнях, если асимметричен сосуд (а) или асимметричны колебания (б).

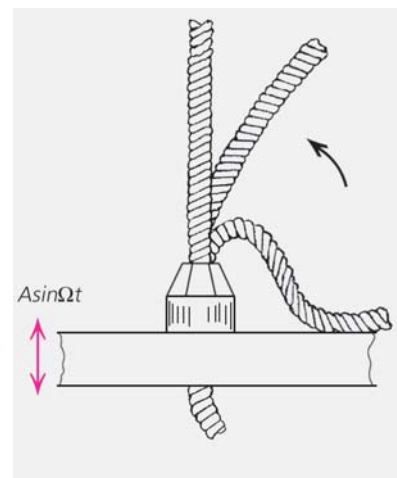


Рис. 12. Эффект индийской магической веревки. Вибрация нижнего конца делает ее верхнее вертикальное положение устойчивым. Встречаются публикации, в которых рассказывается, будто индийским факирам удавалось добиваться устойчивости довольно длинной веревки, по которой взбиралась обезьянка.

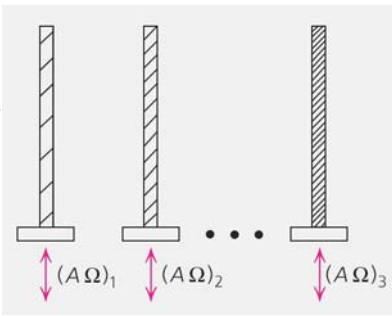


Рис. 13. Изменение эффективной изгибной жесткости стержня под действием вибрации. Жесткость увеличивается при увеличении произведения  $A\Omega$  амплитуды  $A$  на частоту колебаний  $\Omega$ .

емых динамических материалов, идея создания которых недавно была высказана К.А.Лурье и автором [1]. Под динамическими материалами понимаются среды, физические параметры которых (плотность, жесткость, электромагнитные свойства и т. п.) изменяются как в пространстве, так и во времени. Это нечто вроде «живых» материалов, в отличие от обычных (те в этом отношении являются «мертвыми»).

Другими примерами могут служить две или более различных сред, взаимно проникающие одна в другую и совершающие относительно друг друга некоторые движения, в частности, колебания (в последнем случае можно говорить о *вибрационных динамических материалах*).

Динамические материалы должны обладать необычными свойствами, существенно отличающимися от свойств исходных веществ. В частности, можно создать объекты, в которых сравнительно длинные волны распространяются только в одном направлении, так что определенная часть среды окажется изолированной от длинноволновых воздействий. Можно организовать среды так, что они будут быстро гасить или, наоборот, формировать ударные им-

пульсы. Разумеется, определенные трудности представляют конкретные технические способы создания динамических материалов. Такие способы уже начали разрабатываться.

Вышесказанным важными для приложений виброреологические эффекты далеко не исчерпываются. Еще не завершено создание теорий *вибропластичности*, *виброползучести*, *виброрелаксации*, эффекта *усталости материалов*, имеющих немалое практическое значение.

### Может ли вибрация закупорить отверстие в вибрирующем сосуде?

Другое важное поле приложений вибрационной механики — изучение воздействия вибрации на жидкости, газы, газожидкостные среды и суспензии [9]. Как на классический пример такого класса явлений можно сослаться на турбулентное течение жидкости. Роль вибрационных сил тогда (при рассмотрении усредненного потока на основе уравнений Рейнольдса) играют так называемые турбулентные напряжения. Благодаря этим напряжениям эффективная вязкость жидкости (по отношению к медленным движениям, т.е. для наблюдателя  $V$ ) резко возрастает. По образному выражению академика В.В.Новожилова, вода как бы превращается

в патоку. Налицо типичный виброреологический эффект.

Здесь нет возможности остановиться подробно на крайне сложной проблеме турбулентности, а также на весьма интересном явлении вибрационной конвекции. Скажем лишь несколько слов о вибрационном аналоге основного уравнения гидравлики — уравнении Бернулли. В этом уравнении, описывающем «медленную» составляющую потока, возникает дополнительный член, который соответствует перепаду давления, зависящему от параметров вибрации. Данный перепад может быть и положительным, и отрицательным и поэтому вызывать как увеличение, так и уменьшение скорости потока.

На основе «вибрационного» уравнения Бернулли удалось решить ряд интересных прикладных задач, в частности теории вибрационных насосов. Оно может быть использовано для объяснения и описания двух следующих, весьма своеобразных, процессов.

Сравнительно давно известен *виброструйный эффект*. Он состоит в том, что при вибрации в жидкости пластины с коническими отверстиями возникают медленные потоки жидкости в направлении сужения отверстий. Этот эффект успешно используется в ряде технических устройств. Вместе с тем есть информация, что он был причиной некоторых авиа-

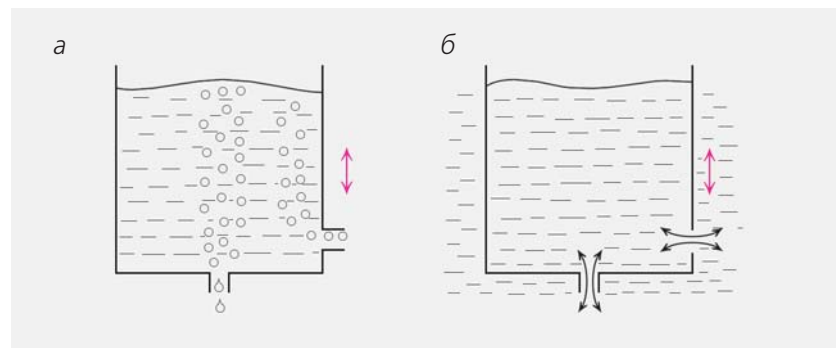


Рис. 14. Вибрационная инъекция. При вибрации сосуда в жидкость внутри него инжигируется газ (а) или другая жидкость (б).

ционных катастроф: вследствие вибрации топливо переставало поступать из баков (имел место эффект вибрационного запания отверстий). В этом случае давление, способствующее истечению топлива, уравновешивается противодавлением, возникающим из-за вибрации.

Другое явление — *вибрационная инжекция газа в жидкость* — было обнаружено недавно [10]. Воздух или другой газ засасывается в вибрирующий в этом газе сосуд с жидкостью через отверстия в его нижней части (рис.14). Впрочем, инжекция будет происходить и в случае вибрации сосуда, помещенного в жидкость, т.е. мож-

но говорить также об вибрационной инжекции жидкости в жидкость. В этом варианте оно родственно виброструйному эффекту с той разницей, что отверстие в сосуде не обязательно должно быть коническим и жидкости в сосуде и вне его не предполагаются одинаковыми.

\* \* \*

Нашей целью было осветить широкий мир удивительных явлений, сопровождающих действие вибрации на нелинейные механические системы, а также наметить общий подход к изучению этих процессов. Многие из них уже находят важное практическое применение, но возмож-

ности здесь еще далеко не исчерпаны. Более того, сам список этих феноменов постоянно пополняется.

Ряд изложенных здесь идей и разработок выполнен инженерами и учеными, имена которых не удалось, к сожалению, упомянуть в тексте статьи. Читатель может найти эти имена в приводимом ниже списке литературы по проблеме. ■

**Работа по проблеме в течение ряда лет поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований, в частности, по проектам 94-01-01322, 99-01-00721 и 01-01-00227.**

## Литература

1. Блехман И.И. Вибрационная механика. М., 1994; англ. пер.: Blekhman I.I., *Vibrational Mechanics (Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications)*. Singapore, 2000.
2. Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике. М., 1988.
3. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. М., 1978—1981.
4. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М., 1964.
5. Гончаревич И.Ф. Вибрация — нестандартный путь. М., 1986.
6. Фролов К.В. Вибрация — друг или враг? М., 1984.
7. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М., 1981; англ. пер.: Blekhman I.I. *Synchronization in Science and Technology*. N.Y., 1988.
8. Белецкий В.В. Резонансные явления во вращательных движениях искусственных и естественных небесных тел // Динамика косм. аппаратов и исслед. косм. пространства. М., 1986.
9. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Динамика частиц при воздействии вибрации. Киев, 1975.
10. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова К.С. // ДАН. 2003. Т.391. №2. С.185—188.

200 экспертов из разных стран мира составили детальное описание 37 незатронутых цивилизацией земель, общая площадь которых более 10 тыс. км<sup>2</sup>. На этих территориях проживает менее 3% населения земного шара (плотность менее 5 человек на 1 км<sup>2</sup>), а 70% растительности не подвергалось антропогенному воздействию. Эти небольшие участки земель в различных географических зонах предлагается взять под защиту.

Sciences et Avenir. 2003. №671. P.28 (Франция).

Со спутников «ERS-1 и -2» на протяжении восьми лет детально изучалось состояние 900 вулканов: измерялись смещения земной коры, которые свидетельствуют о динамике нижележащей магмы. В итоге установлено, что в Андах просыпаются четыре вулкана, считавшиеся потухшими: Гуалька Гуалька, Утурунку, Робледо и Лазурфе. Sciences et Avenir. 2002. №666. P.17 (Франция).

В 1998 г. врачи Лондонского госпиталя Св.Варфоломея совершили поездку в зону веч-

ной мерзлоты Арктики, где эксгумировали тела умерших в 1918 г. во время жесточайшей эпидемии гриппа, широко известного как «испанка», с тем чтобы повысить эффективность современных вакцин. Во время следующей поездки была вскрыта могила Ф.Берна — молодого человека 20 лет. Поскольку он был захоронен в свинцовом гробу, помещенном в кирпичный склеп, поразивший его вирус оказался жизнеспособным.

Sciences et Avenir. 2002. №664. P.28 (Франция).

# Олоротитан — гигантский лебедь из Архары

В.Р.Алифанов,

кандидат биологических наук

Палеонтологический институт РАН

Москва

Ю.Л.Болотский,

кандидат геолого-минералогических наук

Амурский комплексный НИИ Дальневосточного отделения РАН

Благовещенск

О палеонтологических исследованиях в Амурской обл. сообщалось в «Природе» неоднократно [1–3]. Раскопки скелета огромного утконосного динозавра, проводившиеся в летние сезоны 1999–2002 гг. на местонахождении Кундур (Архаринский р-н) силами сотрудников Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, Палеонтологического института РАН и Королевского института естественной истории Бельгии, стали центральным событием последнего времени. Недавно появилось научное описание этого ящера [4].

Следует напомнить, что костеносный горизонт в Кундуре (мощностью около 1,5 м) соответствует нижней части цаганской свиты и датируется ранним—средним маастрихтом (последний век мелового периода). Ископаемые остатки включены в глинистые отложения с обилием неокатанного мелкообломочного материала, который свидетельствует о сходах с возвышенностей обширной Бурейнской котловины гигантских селей, погубивших и захоронивших в своей толще огромное количество обитавших здесь животных. Из раскопа площадью около 100 м<sup>2</sup> извлечены многочисленные щитки черепов (*Amuremys planicostata*), несколько зубов

крокодилов (*Shamosuchus sp.*) и остатки представителей разных групп динозавров. В коллекции имеются зубы и шип анкилозавров из семейства нодозаврид, хвостовые позвонки завропод, а также серия зубов теропод из семейств дромеозаврид и тираннозаврид. Преобладающая часть находок в Кундуре, представленная разрозненными костями и пока одним скелетом, принадлежит утконосым динозаврам, или гадрозавридам (*Hadrosauridae*).

Гадрозавриды — самая процветающая группа динозавров на последних этапах мелового периода. Ее представителей отличают: уплощенное рыло; многочисленные стирающиеся по верхнему краю зубы, организованные в несколько десятков вертикальных рядов (зубные батареи); выпуклые передние поверхности тел шейных и переднегрудных позвонков; четырехпалые кисти, трехпалые стопы с концевыми фалангами копытообразной формы. Специалисты подразделяют гадрозаврид на подсемейства гадрозаврин (*Hadrosaurinae*) и ламбезаврин (*Lambeosaurinae*). Наиболее необычно выглядят представители последней группы. Их носовая полость всегда увеличена в объеме, а кости крыши черепа формируют выше глазниц крупный супракраниальный гребень. Дополнительно для ламбезаврин характерно обрамление носовых отверстий только

предчелюстными костями, извилистость срединного гребня на эмалевой стороне нижнечелюстных зубов, небольшие плечевые кости с крупным дельтопекторальным отростком, высокие остистые отростки спинных позвонков.

Гадрозавр из Кундура классифицирован в составе ламбезаврин и получил название *Olorotitan arbarensis* (что в переводе на русский значит гигантский лебедь из Архары). Это первая находка наиболее полного скелета динозавра в России. При жизни ящер достигал 10 м длины и был одним из самых крупных представителей своего подсемейства. Наиболее яркая отличительная особенность олоротитана заключена в гигантских размерах супракраниального гребня, который направлен за уровень заднего края затылка и имеет форму расширенного на конце выроста. Длинный шейный отдел ящера сформирован 18 позвонками (раньше у гадрозавров не отмечалось более 16 шейных позвонков), в тазовой области имеется 15–16 позвонков (обычно бывает 10–12), а в передней трети хвоста выражено подвижное сочленение соседних позвонков на верхних частях остистых отростков. Последняя черта, ранее не отмечавшаяся у динозавров, свидетельствует о малой подвижности хвоста в вертикальной плоскости. Не исключена патологическая природа такого сочленения.

Олоротитан не первая форма гадрозаврид из Приамурья. Из этого региона прежде уже были описаны остатки манджурозавра (*Mandschurosaurus amurensis*) и харонозавра (*Charonosaurus jiyinensis*) из китайского (провинция Хэйлунцзян) местонахождения Дзяинь, а также амурозавра (*Amurosaurus riabinini*) из Благовещенского местонахождения (Амурская обл.). Описание манджурозавра составлено по нескольким экземплярам, принадлежащим, вероятно, разным видам. Амурозавр и харонозавр известны по фрагментарным материалам, но по ряду особенностей строения черепа все же можно сказать, что они не являются ближайшими родственниками олоротитана. В этом качестве могут быть рассмотрены североамериканские коритозавр (*Corythosaurus*) и гипакрозавр (*Hypacrosaurus*), с которыми кундурского ящера объединяет расширение боковых отростков предчелюстных костей и увеличение размеров лобных костей.

География находок ламбеозаврин ограничена Азией, где эта группа известна из сантонских, а возможно, и более ранних отложений, и Северной Америкой, где она представлена в верхнекампанских и нижнемаастрихтских породах. Такое распространение отмечается, например, у растительноядных неоцератопсий (рогатые динозавры) или у хищных тиранозаврид, корни которых уходят в ранний мел Азии. Считается, что эти группы имеют азиатское происхождение и проникли на территорию Северной Америки через Берингийский мост, существовавший в течение второй половины или, по некоторым данным, в середине мелового периода.

Интересно, что гадрозаврины имеют более широкое распространение, чем ламбеозаврины. Кроме



Скелет олоротитана — гигантского утконосного динозавра из Амурской обл. На черепе хорошо видна его самая яркая отличительная особенность — массивный гребень в форме расширенного на конце выроста направлен за край затылка. Это наиболее полный скелет динозавра, найденный на территории России.

Азии и Северной Америки их остатки обнаружены в Европе, Южной Америке и Антарктиде. Такая география находок делает азиатское происхождение гадрозаврин сомнительным. При этом важно иметь в виду, что обособление Палеоазии от остальной Лавразии путем расширения акватории Тургайского моря произошло в течение второй половины юрского периода, т.е. задолго до формирования азио-американской связи. В этом случае верхняя граница времени происхождения гадрозавров соответствует началу изоляции древнеазиатской суши. Это те-

оретическое заключение остается лишь подтвердить новыми находками. Пока конкретные палеонтологические материалы показывают, что в герпетофауне Северной Америки гадрозавры процветали в позднем кампане и раннем маастрихте, за чем последовал рост разнообразия рогатых динозавров из семейства Ceratopidae. На территории Северной Азии, судя по данным из России и Китая, в течение маастрихта доминировали только гадрозавры. ■

Работа поддержана грантом Миннауки НШ-1840.2003.4.

## Литература

1. Болотский Ю.Л., Алифанов В.Р. Там, где жил амурозавр // Природа. 2001. №6. С.67—69.
2. Курочкин Е.Н., Алифанов В.Р. Снова о динозаврах Приамурья // Там же. №11. С.83—84.
3. Туманова Т.А., Алифанов В.Р., Болотский Ю.Л. В России впервые обнаружены остатки панцирных динозавров // Природа. 2003. №3. С.69—70.
4. Godefroit P., Bolotsky Yu., Alifanov V. // Pomptes Rendus Paleovol. 2003. №2. P.143—151.



# Северная Земля: 90 лет после открытия



Л.М.Саватюгин, Е.В.Шевнина

«Телеграф принес сенсационное известие: русские ледоколы “Таймыр” и “Вайгач” открыли в Ледовитом океане огромный участок суши, по размерам не меньше Гренландии (телеграмма г.Вилькицкого называет его даже материком), простирающийся, по словам телеграммы, за 81°с. шир. и 102°вост. долготы; суша эта получила название з.Императора Николая II», — так начинается небольшая заметка в октябрьской книжке журнала «Природа» за 1913 г. [1]. К тому времени все крупные географические открытия уже сделаны, составлены карты материков, океанов и архипелагов, покорены Северный и Южный полюса. И вот закрыто последнее белое пятно в Северном Ледовитом океане.

Предположение о существовании к северу от п-ова Таймыр неизвестной земли высказывал М.В.Ломоносов, а затем П.А.Кропоткин, А.Э.Норденшельд и др. Ее «призрак» усмотрели в 1810 г. с мыса Каменного на о.Новая Сибирь М.М.Геденштром и Я.Санников, а в 1885 г. с о.Котельного — Э.В.Толль. Поэтому на навигационных картах начала XX в. она обозначалась пунктиром как обширный остров. Но до 1913 г. эту землю никто воочию не видел —



**Лев Михайлович Саватюгин**, кандидат географических наук, начальник отдела географии полярных стран Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. Более трети века изучает полярные районы Земли: участник шести антарктических и многочисленных арктических экспедиций. Работал на Северной Земле, дрейфующей станции «Северный полюс», Шпицбергене, Полярном Урале, Памире и т.д.



**Елена Валентиновна Шевнина**, кандидат технических наук, научный сотрудник того же института. Занимается водными ресурсами и гидрологией процессов в устьях рек, изучением гидрологических процессов с применением математических моделей формирования стока. Участник трех экспедиций на Шпицберген.

огибая п-ов Таймыр, мореплаватели прижимались к материковому берегу из-за постоянно державшегося здесь льда.

Северное морское побережье России было изучено крайне слабо. Только во время русско-японской войны возник вопрос об организации здесь постоянных метеорологических станций. Стратегическую важ-

ность Северного морского пути понимали и военные моряки, и многие ученые: адмирал С.О.Макаров разработал план сквозного плавания по этой трассе боевых кораблей с помощью ледокола, а Д.И.Менделеев выдвинул свой знаменитый план изучения Арктики.

В 1908 г. царские власти, наконец, предусмотрели расходы

на проведение морской и сухопутной экспедиций в восточную часть Северного Ледовитого океана. Но спустя два года профинансировали только морскую, организацию которой поручили генерал-лейтенанту А.И.Вилькицкому. По его инициативе был заключен контракт с Невским судостроительным заводом на постройку двух ледокольных пароходов «Таймыр» и «Вайгач», водоизмещением по 1359 т, спущенных на воду весной 1909 г.

По тому времени они обладали отличными мореходными качествами: максимальной скоростью — 10,5 узлов, дальностью плавания — 11 тыс. миль, могли ломать лед толщиной до 60 см. Суда были оснащены новейшими навигационными приборами, радиостанцией с максимальной дальностью связи до 150 миль. Кроме того, на борту имелись технические средства для экспедиционных исследований на море и суше. Приписанные к военному флоту пароходы были переданы из Балтийской флотилии в Сибирскую с базированием во Владивостоке, куда они прибыли 3 июля 1910 г., чтобы принять на борт гидрографическую экспедицию Северного Ледовитого океана (ГЭСЛО).

## На «Таймыре» и «Вайгаче»

Эта экспедиция в 1910—1912 гг. проводила промеры, опись побережья материка и близлежащих островов к западу от мыса Дежнева до бухты Тикси. В 1912 г. «Таймыр» и «Вайгач» должны были пройти до Таймыра, но встретили непроходимые скопления льда и возвратились в Берингов пролив. В феврале 1913 г. командиром «Таймыра» был назначен 28-летний сын А.И.Вилькицкого капитан 2-го ранга Б.А.Вилькицкий, а «Вайгача» — 30-летний старший лейтенант П.А.Новопашенный [2].

Программа работ ГЭСЛО на этот год предусматривала проведение морской описи восточного и северного берегов Таймыра с последующим проходом в европейские воды. Суда вышли из Владивостока 26 июня, а 11 июля у начальника экспедиции полковника корпуса флотских штурманов И.С.Сергеева произошло кровоизлияние в мозг, он был отправлен обратно. Руководство экспедицией поручили Б.А.Вилькицкому. Именно ему предстояло совершить самое крупное географическое открытие XX в.

В ходе обследования акватории у побережья полуострова корабли совершали плавание раздельно, но капитаны условились, что встретятся у о.Преображения. «Таймыр» направился к Новой Сибири для обследования акватории моря с северо-востока от острова, в район мифической Земли Санникова, и, не обнаружив ее, взял курс к полуострову. 20 августа вахтенный офицер А.Н.Жохов заметил очертания неизвестной суши. Она оказалась островом длиной около 30 км и шириной 8—10 км (ныне Малый Таймыр). С востока и севера его описали «таймырцы», а с юга — «вайгачцы».

Затем, встретив в районе мыса Челюскин сплошной лед и пытаясь обойти его, суда направились на север. На рассвете 21 августа (3 сентября по новому стилю) показались высокие, массивные горы, которые первыми увидели врач «Таймыра» Л.М.Старокадомский и лейтенант Н.И.Евгенов, несший тогда вахту.

На следующий день экспедиция осматривала и наносила на карту берега. На мысе Берга (80°с.ш.) был зачитан приказ начальника экспедиции об открытии новых земель и присоединении их к России и поднят русский национальный флаг. Этот день стал триумфальным для российских мореходов и гидрографов, осваивавших на протяжении трех столетий Северный морской путь.

Корабли проследовали до северной оконечности вновь открытой земли (ныне мыс Арктический), однако далее экспедиция не смогла пройти из-за скопления льда и повернула на юг, пытаясь пробиться в Карское море. Но сплошные ледяные поля преградили путь исследователям, и они были вынуждены взять курс на Владивосток, куда прибыли 12 ноября, оставив за кормой более 13 тыс. миль. В следующем, 1914 г., суда вновь подошли к мысу Челюскин. Но большое ледяное поле не подпускало их к открытой земле. Зато был виден низменный юго-западный берег, который удалось запеленговать и положить на карту. Из короткой экскурсии на берег были доставлены образцы горных пород. На этом работы завершились. Простираение земли на север и запад, как и в 1913 г., осталось невыясненным [3].

17 ноября 1913 г. во владивостокской газете «Далекая окраина» была помещена фотография личного состава экспедиции с текстом, в котором значилось, что сами участники экспедиции определили открытую ими сушу как большой остров и собирались назвать его Тайвай в честь кораблей «Таймыр» и «Вайгач». Но «Государь Император Высочайше повелеть соизволил: присвоить земле, расположенной к северу от мыса Челюскин наименование: «Земля Императора Николая II»; острову, лежащему к северу от того же мыса, — «Остров Цесаревича Алексея» и островку к юго-востоку от острова Беннета — «Остров Генерала Вилькицкого». Так было сказано в приказе морского министра от 10 января 1914 г. В сентябре 1916 г. царское правительство обратилось к правительствам «союзных и дружественных держав» с нотой о включении вновь открытых земель во владения России. Первая мировая война и последовавшие за ней Октябрьская революция и гражданская война не оставили времени для их исследований.



«Таймыр» у берегов открытого архипелага. 1913 г.



Поднятие российского флага.



Б.А.Вилькицкий (1885—1961).

Судьба Бориса Андреевича Вилькицкого, первооткрывателя архипелага, была трагичной — большую часть жизни он провел вдали от родины, практически не у дел. После расформирования экспедиции командовал эсминцем «Летун», затем осуществлял навигационно-гидрографическое обеспечение белогвардейской продовольственной Карской экспедиции и в феврале 1920 г. бежал из Архангельска за границу. Позже он возглавлял гидрографические работы в Заире, а затем жил в Брюсселе, где и умер в 1961 г. В 1996 г. (300-летие российско-го флота) прах Вилькицкого

был перевезен в Санкт-Петербург и захоронен на Смоленском кладбище рядом с могилами отца и брата.

### По нехоженой земле

На первой советской навигационной карте Северного морского пути архипелаг не был обозначен. С новым названием «Северная Земля» (согласно Постановлению Президиума ЦИК СССР от 11 января 1926 г.) он появился только в 1928 г. на новой карте Северного Ледовитого океана. Это было время попыток иностранных держав присвоить северные острова, в частности о.Врангеля. Советские власти раз и навсегда закрепили их принадлежность Российской Федерации.

Осенью 1929 г. молодой полярник Г.А.Ушаков, только что прибывший в Москву после трехлетней зимовки на о.Врангеля, представил Полярной комиссии Академии наук СССР проект исследования Северной Земли. Он был утвержден Совнаркомом и включен в первоочередной план экспедиционных работ Института по изучению Севера (ныне Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт — ААНИИ). Начальником экспедиции был назначен Ушаков, в нее вошли геолог Н.Н.Урванцев — один из первооткрывателей природных богатств Таймыра, ар-

хангельский помор С.П.Журавлев — лучший зверобой-промысловик Новой Земли и ленинградский радиолобитель-коротковолновик В.В.Ходов, на которого возлагались обязанности радиста и метеоролога.

15 июля 1930 г. ледокольный пароход «Георгий Седов» (начальник рейса О.Ю.Шмидт) вышел из Архангельска к берегам Северной Земли. Предстояло ее заново открыть, закартировать и описать. 22 августа судно высадило участников экспедиции на необитаемый островок, который впоследствии назвали Домашним. 30 августа здесь был поднят флаг, а с 1 октября в эфир пошли регулярные метеосводки и отчеты.

В 1931 г. была проведена первая аэрофотосъемка островов архипелага на дирижабле «Граф Цеппелин» под руководством Г.Эккнера с участием директора Института по изучению Севера Р.Л.Самойловича, который возглавил научную часть экспедиции, организованной Международным обществом по изучению Арктики при помощи воздушных аппаратов [4]. Ее основными задачами стали наблюдения над малоизученными полярными областями и испытание дирижаблей для работы в высоких широтах. Полет «Графа Цеппелина» начался в конце июля по маршруту: Берлин—Москва—Архангельск — о.Моржовец—Земля Франца-Иосифа—Северная Земля—Таймыр—

ский п-ов—Новая Земля. Полет оказался эффективным, в частности были получены важные сведения о строении архипелага Северная Земля, описаны основные особенности гидрографической сети и формы оледенения. Намечалось, что экипаж дирижабля встретится с экспедицией Ушакова, основавшей стационарную базу на о. Домашнем. Однако из-за сильного тумана этого сделать не удалось.

За два года исследований Ушаков с товарищами прошли на собачьих упряжках свыше 5 тыс. км и составили первую подробную карту. Оказалось, что Северная Земля — обширный архипелаг, состоящий из четырех больших островов (Большевик — 11312 км<sup>2</sup>, Комсомолец — 9006 км<sup>2</sup>, Пионер — 1522 км<sup>2</sup>, Октябрьской Революции — 13708 км<sup>2</sup>) и множества мелких. Участники экспедиции определили географическое положение береговой линии, описали геологическое строение островов и вышли к северной оконечности архипелага — мысу Арктический (81°16'с.ш). Длина береговой линии составила 3498 км, а общая площадь архипелага — 36 788 км<sup>2</sup>. По признанию мировой общественности, результаты, полученные героической четверкой, стали выдающимся достижением XX в.

## Природа архипелага

В этой и последующих экспедициях выявились природные особенности Северной Земли. Рельеф большинства островов, за исключением их приподнятых центральных, покрытых льдом зон, — преимущественно платообразный, низменно-равнинный, с высотами не более 800—1000 м над ур.м.

Северная Земля полностью расположена в пределах зоны арктических пустынь, ее почвы и растительность характеризуются мозаичностью, возникающей за счет различий в водно-тепловом режиме при условии



Участники экспедиции 1930—1932 гг.: Н.Н.Урванцев, Г.А.Ушаков, С.П.Журавлев, В.В.Ходов.



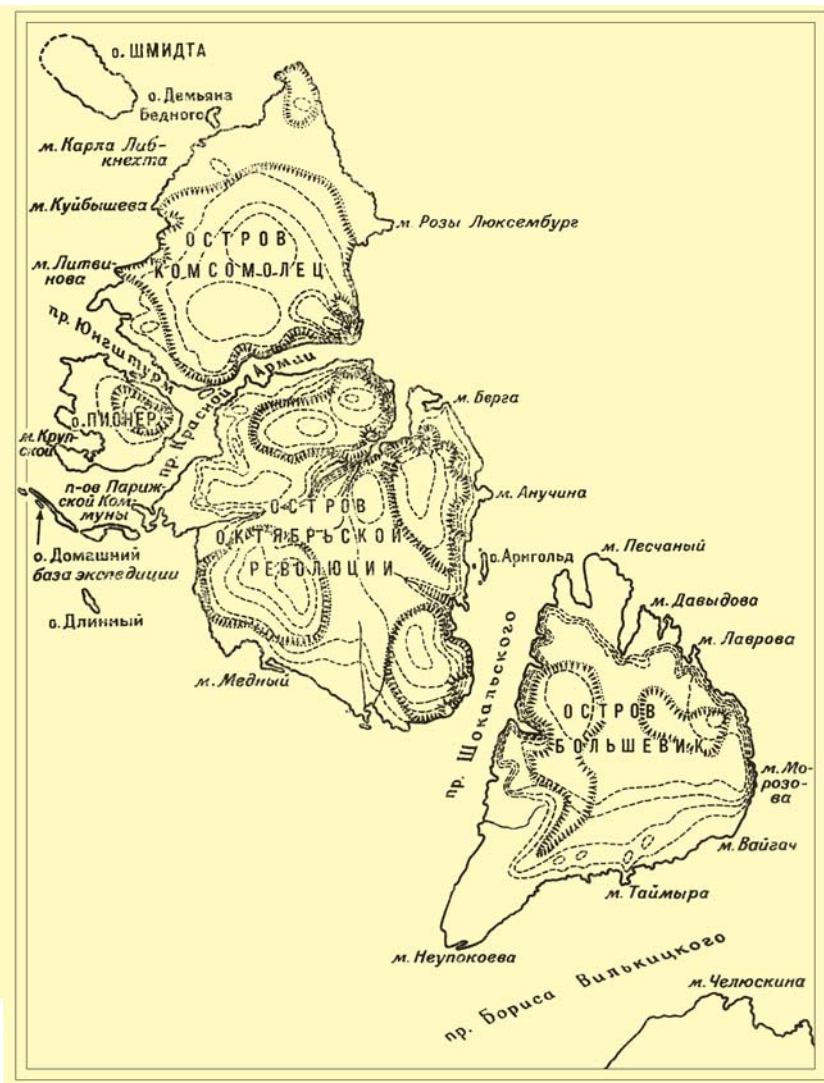
Домик Ушакова с мемориальной доской. Перенесен с о. Домашний на о. Средний.

Здесь и далее фото Л.М.Саватюгина

близкого залегания многолетней мерзлоты. Среди семейств разреженного растительного покрова преобладают крестоцветные, камнеломковые, злаковые и гвоздичные, но наиболее широко распространены мхи и лишайники. Из цветковых видов преобладают полярный мак, ясколка, лапчатка и крупки. Острова покрыты растительностью

на 50—80%. В наиболее благоприятных условиях встречаются небольшие участки арктических тундр.

Своеобразен и животный мир. Более всего видов, трофически связанных с морем. Это в основном птицы, заселяющие побережье и образующие колонии: серебристые чайки, бургомистры, моевки и др. Иногда



Северная Земля по съемке ГЭСЛО 1913—1914 гг. (слева) и экспедиции Г.А.Ушакова 1930—1932 гг.

встречается сапсан, который изредка гнездится в полярной пустыне, на пролетах и кочевках попадаются редкие виды чаек: розовая, вилохвостая, белая. Всего на архипелаге около 15 видов птиц.

Что касается млекопитающих, то в южной части архипелага встречаются северные олени, лемминги, песцы, волки. Белый медведь обитает повсеместно, основная его пища — кольчатая нерпа, морской заяц, реже — морж. Поедает он и птиц, их яйца, отбросы птичьих колоний, падаль и даже морские растения.

В районах, свободных от современного оледенения, хоро-

шо развита относительно молодая гидрографическая сеть с невыработанными продольными профилями, водопадами и порогами. Наиболее крупные реки — Озерная, Ушакова, Тора, Лагерная, Многоструйная. Питание рек преимущественно ледниковое и снежно-ледниковое, доля осадков невелика. Сток существует только в летнее время (около 70 дней).

Озер на архипелаге немного, наиболее крупные (Фиордовое и Приледниковое) располагаются у краев ледников. Более распространены термокарстовые, приуроченные к зонам вытаивания ледяных включений в мерзлых грунтах. На прибреж-

ной равнине и в приустьевых участках рек встречаются солончатые лагунные озера — это заливы моря, которые были отделены от него при тектонических поднятиях. Промышленных запасов полезных ископаемых нет. Однако в некоторых частях о.Октябрьской Революции были найдены золотые россыпи.

### Особенности оледенения

Северная Земля — один из наиболее крупных районов современного оледенения Российской Арктики. По его интенсивности он уступает только



Буровая установка на о.Комсомолец.



Ледяной керн — хранитель палеоклиматической информации за прошедшие тысячелетия.

Земле Франца-Иосифа и о.Северному на Новой Земле. Оледенение островов относится к покровному типу. Среди ледниковых комплексов — щиты (ледник Академии Наук на о.Комсомолец, ледники Русанова, Карпинского, Университетский на о.Октябрьской Революции, Ленинградский на о.Большевик) и сложные купола (ледники Альбанова, Вавилова, Дежнева на о.Октябрьской Революции, Мушкетова, Войцеховского, Гастелло, Аэросъемки, Семенова-Тян-Шанского, Федченко, Кропоткина, Гротов на о.Большевик). Еще один морфологический тип — выводные ледники (Академии Наук, Русанова, Карпинского, Университетский, Семенова-Тян-Шанского и Гротов), многие из которых достигают моря и продуцируют айсберги. Из ледяных берегов североземельских островов протяженностью 500,8 км на долю айсберговых фронтальных обрывов высотой 15—30 м приходится 191,5 км. Некоторые выводные ледники щитов Русанова, Карпинского и большинства ледяных комплексов на о.Большевик не доходят до моря, а оканчиваются моренами либо в долинах, либо в пределах прибрежных равнин.

Площадь оледенения островов возрастает с юго-востока на северо-запад в соответствии

с понижением границы питания ледников. Наиболее высока эта граница на о.Большевик (600 м), где ледники покрывают 31% поверхности, постепенно снижаясь до 370—300 м в районе купола Академии Наук на о.Комсомолец, полностью покрытом льдом, и о.Шмидта (58% поверхности). Изолированные ледники, располагающиеся на значительных гипсометрических уровнях (до 400—500 м), сменяются по направлению на северо-запад более крупными монолитными покровами, подножья которых расположены на небольшой высоте (50—100 м).

Первые данные о ледниках архипелага были получены в 1948—1951 гг. сотрудниками Научно-исследовательского института геологии Арктики, проводившими топографическую съемку масштаба 1:1 000 000. В 1950 г. физико-географический отряд АНИИ под руководством Е.С.Короткевича обследовал о.Октябрьской Революции и провел там метеорологические, снегомерные и гляциологические наблюдения. Тогда же начали работу метеостанции на Краснофлотских о-вах и о.Большевик. Ранее действующая метеостанция с Домашнего была перенесена на Голомянный, где работает и поныне.

В 1952 г. была произведена повторная аэрофотосъемка ар-



Вход в холодную лабораторию.

хипелага, ставшая основой для построения его крупномасштабных карт и которая до сих пор используется для сравнительных географических исследований. В 70—80-х годах поисковые и разведочные работы объединения «Севморгеология» позволили создать геологические и геоморфологические карты масштаба 1:200 000.



Выгрузка экспедиции «Северная Земля-1999» на ледниковый купол Академии Наук.



В бухте Журавлева.

Комплексное изучение архипелага начато в 1962 г. экспедицией ААНИИ под руководством гляциолога Л.С.Говорухи. В октябре 1968 г. и июне 1969 г. впервые здесь был применен метод радиолокационного зондирования для изучения ледников евразийского сектора Арктики. Гляциологические зоны архипелага и их высотное положение были выявлены путем сопоставления большого числа

разрезов на вершинах ледниковых куполов [5]. С помощью снегомерных полигонов и бурения глубоких скважин с отбором ледяного керна измерены скорости движения льда, определены температурный режим и структура ледников, характер льдообразования. Эти исследования стали основой для создания Каталога ледников Северной Земли. В 1974 г. на архипелаге был организован гляцио-

логический стационар ААНИИ «Купол Вавилова», высокоширотная научная станция нового типа [5]. Тематика исследований на базе стационара охватывала широкий круг проблем. В отличие от станций «Северный полюс», дрейфовавших в морских льдах Северного Ледовитого океана, она располагалась на вершинном плато ледникового купола Вавилова, покрывавшего западную часть о.Октябрьской Революции.

На архипелаге Северная Земля существуют ледники, медленно реагирующие на изменения климата и быстро деградирующие ледниковые шапки. Исследования позволили выявить основные черты их массообмена. В среднем многолетняя зимняя аккумуляция (накопление льда) составляет  $20 \text{ г/см}^2$ , летняя абляция (таяние) —  $39 \text{ г/см}^2$ , айсберговый сток —  $2 \text{ г/см}^2$  и отрицательное сальдо годового бюджета —  $21 \text{ г/см}^2$ . Эта первая оценка составляющих среднегодового баланса подтвердили наблюдения, проведенные нашими сотрудниками. Североземельские ледники в 60—80-е годы в среднем ежегодно теряли  $2\text{—}3 \text{ км}^3$  льда, или около  $130 \text{ мм}$  в водном эквиваленте со всей площади оледенения (менее 0.001 доли по объему и толщине покрова).

Многообразие и широкое распространение ледников сделали архипелаг природной лабораторией для исследований летописи климатических изменений, которую расшифровывают по кернам — колонкам льда диаметром  $10 \text{ см}$ . Их анализ позволяет получать данные, используемые для палеоклиматических реконструкций, и в том числе производить изотопную датировку.

Восстанавливать природные условия позволили также исследования геоморфологического строения и четвертичных отложений архипелага, которые проводились на Северной Земле с 1974 г. Д.Ю.Большаиновым и В.М.Макеевым [6].

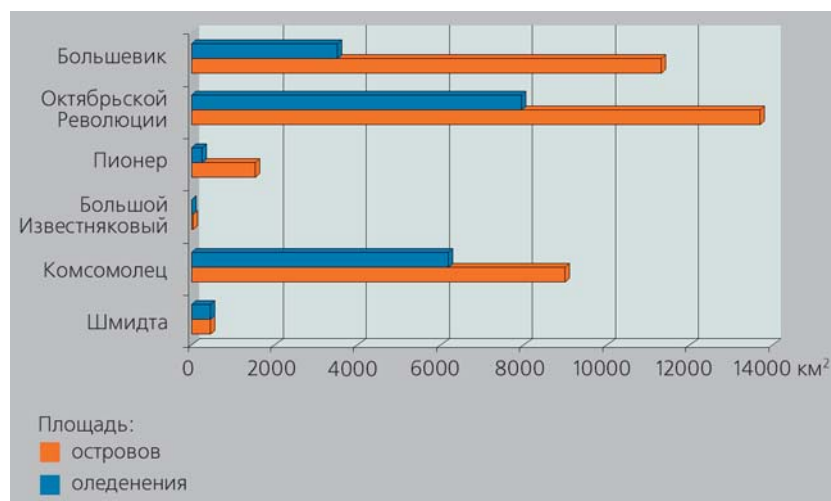
## Палеогеография и прогноз

Самое длительное и значительное оледенение на островах началось 90–88 тыс. лет назад и продолжалось около 20 тыс. лет. В период от 70–68 до 50 тыс. лет назад в пределах прибрежных низменных участков вновь появился морской бассейн, а наземное оледенение практически деградировало. После некоторого понижения уровень моря вновь начал подниматься и достиг на Северной Земле максимума 34–32 тыс. лет назад. На наиболее приподнятых участках суши в связи с глобальным похолоданием вновь началось образование ледников, но процесс этот шел очень медленно. Причины — дефицит осадков и блокировка крупными ледниковыми покровами Северной Европы поступления влажных воздушных масс из Северной Атлантики, а также значительное сокращение Северного Ледовитого океана (из-за глубокой регрессии Мирового океана). На свободных ото льда участках суши господствовали резко континентальный климат и тундростепные ландшафты, характерные для всей азиатской Арктики в целом. Судя по серии радиоуглеродных датировок мамонтовых остатков, крупные млекопитающие проникали на территорию Северной Земли на протяжении нескольких тысяч лет (24–19 тыс. лет назад).

В конце этого времени началось разрастание ледников, а максимальным оледенение было 15–13 тыс. лет назад, на 3–4 тыс. лет позже, чем в Европейской Арктике. Это, вероятно, произошло из-за поступления влажных масс из Северной Атлантики после значительного сокращения Скандинавского ледникового щита. Однако рост ледников продолжался недолго, и 11,5 тыс. лет назад они уже имели размеры, близкие к современным или даже меньшие. В начале голоцена (10,0–



Первая палатка экспедиции 1999 г. на куполе Академии Наук.



Соотношение площади оледенения островов архипелага и их общих площадей по современным данным.

8,8 тыс. лет назад) в связи с общеглобальным повышением солнечной инсоляции на 10% и увеличением летней температуры воздуха усилилось таяние ледников. Складывались благоприятные условия для развития растительности. Географическая зональность была нарушена. Затем снова наступает похолодание и, как следствие, формирование современных ледниковых куполов.

Некоторое его сокращение вместе с незначительным подь-

емом моря произошло около 4–3 тыс. лет назад. Судя по заметному увеличению толщи озерных отложений, 700–450 лет назад на архипелаге было тепло, средняя июльская температура воздуха над островной сушей возрастала до 3,5°C, что могло сказываться на усилении таяния ледников. Но позже из-за похолодания площадь оледенения вновь увеличилась. Время его наибольшего распространения в голоцене относится к малому ледниковому периоду.





Гало над Северной Землей.



Автоматическая станция через год после установки.

Данные, полученные при палеогеографических исследованиях и при анализе кернов глубокого бурения ледниковых куполов, совпадают, что позволяет утверждать правомерность предположений о развитии архипелага в прошлом.

Значительная амплитуда колебаний температуры в голоцене (порядка 8—9°C) и сравнение ее с нынешней позволяют считать, что в наше время температура не достигает ни минимальных, ни максимальных значений более ранних фаз потепле-

ний или похолоданий. Нет оснований полагать, что в ближайшие 10—15 лет что-то изменится коренным образом. Однако не исключена медленная эволюция климатической системы, завершающаяся в конце концов качественно новым состоянием.

Мы полагаем, что до 2005 г. температура воздуха в целом для Арктики повысится не более чем на 1,5°C, при этом тенденция роста зимой будет выше, чем летом. Все другие метеорологические параметры, включая характеристики влагооборота, будут изменяться как в сторону увеличения, так и уменьшения; ледники в Арктике будут сохранять стабильность, с колебаниями  $\pm 5$ —50 см в отдельные годы.

Анализ информации, полученной методами изотопной гляциологии, подтверждает прогноз многих климатологов, согласно которому уже ближайшее десятилетие ознаменуется началом нового 40-летнего цикла естественного потепления. Если темп сжигания минерального топлива не снизится, то его наложение на парниковый эффект CO<sub>2</sub>, накапливающегося в атмосфере, может вызвать беспрецедентное для последних 1000 лет потепление.

Для прогноза развития полярных ледников необходимо продолжить исследования баланса их массы, изменений высоты поверхности, внутреннего строения, гидротермического состояния, реакции ледников на изменения климата и т.д. Чтобы решить эти задачи, необходимо более широкое применение аэрокосмических методов и радиозондирования, организация мониторинга изменений полярных ледников. Однако надежда провести эти исследования призрачна, как когда-то сама Северная Земля.

\* \* \*

С 1989 г. характер исследований здесь, как и во всей Российской Арктике, где закрыто почти 90% полярных станций, стал

эпизодическим. Финансирование редких экспедиций проводится в основном за счет иностранных коллег. Так, в апреле—мае 1997 г. состоялась гляциологическая радиолокационная экспедиция на Североземельский архипелаг в рамках договора между Центром гляциологии Уэльского университета (Англия), Институтом морских и полярных исследований Альфреда Вегенера (Германия), Институтом географии РАН и Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом. Весной 1999 г. на Северную Землю была организована еще одна совместная экспедиция (ААНИИ, Санкт-Петербургский горный институт, Институт Альфреда Вегенера) под руководством одного из авторов этих строк — Л.М.Саватюгина. Проводились буровые работы на куполе Академии Наук с отбором керна льда для структурно-стратиграфических, изотопных и геохимических анализов. В 2001 г. был пройден самый мощный ледниковый купол архипелага, поднят ледяной керн с глубины 724 м. Он несет в себе информацию о климате региона за последние 8—9 тыс. лет [8] и вывезен в Германию для лабораторных исследований.

В наши дни архипелаг перестал быть только научным по-



Участники гляциологической экспедиции «Северная Земля-2001».

лигоном. Сегодня с мыса Арктического стартуют группы людей и одиночки, мечтающие покорить Северный полюс. Работает единственная метеостанция на о.Голомянном, да еще погранзаства на о.Среднем, где сотрудниками ААНИИ и коллективом объединения «Полярные трассы» в домике Ушакова создан краеведческий музей, пожалуй, самый северный в мире. Но посещают его в основном иностранные туристы и спортсмены. Законсервирована когда-то одна из лучших полярных стан-

ций в Арктике — Прима на о.Большевик, предназначенная для проведения широкого комплекса арктических исследований. Ее не так трудно возродить к жизни: Северная Земля, на которой 90 лет назад был поднят российский флаг, требует внимания и государственной заботы. Приближается III Международный полярный год, и полузабытый архипелаг мог бы стать настоящим полигоном для исследований ученых многих стран. Все возможности для этого имеются. ■

## Литература

1. Григорьев С. Новая суша в Ледовитом океане // Природа. 1913. №10. С.1236—1238.
2. Рыков В.А. // Мор. сб. 1996. №11. С.17—20.
3. Ушаков Г.А. Остров метелей. По нехоженной земле. СПб., 2001.
4. Самойлович Р.Л. Геоморфологические и гляциологические наблюдения во время полета на воздушном корабле «Граф Цеппелин» летом 1931 года // Тр.ААНИИ. Т.13. С.5—28.
5. Говоруха Л.С. Исследования Североземельского гляциологического стационара // Тр.ААНИИ. 1981. Т.367.
6. Большаянов Д.Ю., Макеев В.М. Архипелаг Северная Земля — оледенение, история развития природной среды. СПб., 1995.
7. Даудсвелл Дж.Э., Горман М.Р., Уильямс М. и др. Воздушные радиолокационные исследования ледниковых куполов на Северной Земле. Апрель—май 1997 г. // Материалы гляциол. исслед. 1998. Вып.284.
8. Саватюгин Л.М., Архитов С.М. и др. Российско-германские гляциологические исследования на Северной Земле и прилегающих островах // Материалы гляциол. исслед. 2000. Вып.91. С.150—162.

# Вернадский глазами царской охраны

М.Ю.Сорокина,

кандидат исторических наук  
Архив РАН  
Москва

Многолетняя общественная деятельность Владимира Ивановича Вернадского (1863—1945) и эволюция его взглядов на различные проблемы внутренней и внешней политики России пока еще остаются недостаточно исследованными. Активное участие Вернадского в общественном противостоянии самодержавию, особенно до 1905 г., не нашло полного отражения в материалах его личного фонда, хранящихся в Архиве РАН (АРАН). Возможность ареста, конфискации документов и прочее накладывали известный отпечаток на переписку и дневниковые записи. Восполнить этот пробел в общественно-политической биографии Вернадского помогает информация «с другой стороны» — материалы наблюдений за ним, его семьей, коллегами и друзьями, оказавшиеся в фонде Московского охранного отделения (МОО)\* в Государственном архиве Российской Федерации (ГАРФ).

«Дело» по наблюдению за Вернадским было заведено в Московской охране в конце 1890 г. Первый документ датирован 23 декабря 1890 г., когда МОО подготовило ответ на за-

прос Департамента полиции (ДП) Министерства внутренних дел (МВД) о посетителях В.И.Вернадского — хранителя минералогического кабинета при Московском университете [2. Л.1—1об]. Среди таковых ДП интересовали ближайшие друзья Вернадского — «Федор, Сергей, Адька» — Ф.Ф. и С.Ф.Ольденбурги и А.А.Корнилов\*\*. С этого момента московская охранка начала постоянно следить за Вернадским и его окружением [2. Л.2—2об].

Следующий документ, касающийся общественной деятельности Вернадского, появился в его «личном полицейском деле» в 1895 г., после того как ДП

\*\* Корнилов Александр Александрович (1862—1925) — историк, автор первого систематического курса истории России XIX в., монографий о М.А.Бакуanine. Секретарь ЦК кадетской партии; Ольденбург Сергей Федорович (1863—1934) — востоковед-индолог. Академик Петербургской АН, ее непреходящий секретарь (1904—1929). Член ЦК кадетской партии, министр народного просвещения Временного правительства. Директор Азиатского музея, ставшего затем Институтом востоковедения АН СССР в 1916—1934 гг.; Ольденбург Федор Федорович (1862—1914) — педагог, статистик и общественный деятель (кадет). Брат С.Ф.Ольденбурга. В 1887—1914 гг. руководил женской учительской школой им.Максимовича в Твери. В.И.Вернадский, братья Ф.Ф. и С.Ф.Ольденбурги, А.А.Корнилов, Д.И.Шаховской (см. ниже) в середине 1880-х годов составили ядро братства — своеобразного духовного союза, «коллективной личности», — идейно-нравственные установки которого сохраняли на протяжении всей жизни. Подробнее см. [3, 4, 5].

перлюстрировал письмо Н.А.Кабанова, сверхштатного ординатора при госпитальной терапевтической клинике Московского университета, А.И.Шингареву\*\*\* от 7 января 1895 г., в котором речь шла о кружке Н.А.Кабанова, А.И.Шингарева, П.Г.Виноградова\*\*\*\*, В.И.Вернадского и др., собиравшегося издавать дешевую «научно-образовательную библиотеку». По словам Кабанова, Виноградов и Вернадский «не просто редакторы, а ближайшие члены кружка», они «особенно горячо взялись за дело», а последний «обещал <...> познакомиться с интеллигентными именитыми и неименитыми тверитянами (Шаховской, Петрункевич\*\*\*\*\* и др.)» [6].

\*\*\* Шингарев Андрей Иванович (1869—1918) — общественный деятель, врач, публицист. Член ЦК кадетской партии. Депутат II—IV Государственных Дум. В первом составе Временного правительства министр земледелия, во втором — министр финансов.

\*\*\*\* Виноградов Павел Гаврилович (1854—1925) — историк-медиевист, академик Петербургской АН, профессор Московского (1884—1902; 1908—1911) и Оксфордского университетов (с 1903 г.), гласный Московской городской думы (с 1897 г.).

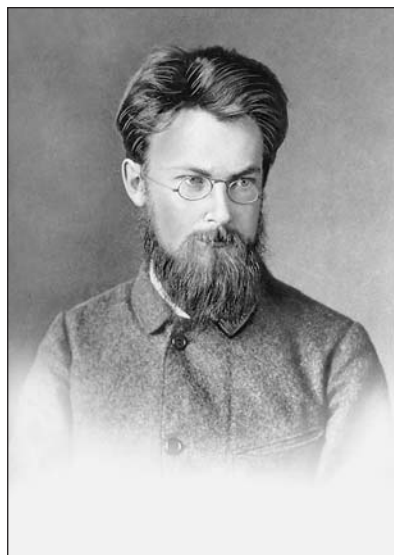
\*\*\*\*\* Шаховской Дмитрий Иванович (1861—1939) — историк, публицист, исследователь творчества П.Я.Чаадаева. Один из основателей кадетской партии, член ее ЦК. Депутат и секретарь I Государственной думы. Министр государственного призрения Временного правительства. Ближайший друг Вернадского со студенческих лет; Петрункевич Иван Ильич (1843—1928) — один из учредителей кадетской партии и председатель ее ЦК (1909—1915). После 1917 г. в эмиграции.

\* Точное название: Отделение по охранению общественной безопасности и порядка в г.Москве. Обзор материалов этого фонда (№63), касающихся научных деятелей, см. [1].

В том же году «дело» Вернадского пополнилось. Следующий документ датирован 11 марта 1895 г., когда Министерство народного просвещения запросило о благонадежности жены Вернадского, Натальи Егоровны [7], в связи с ее желанием открыть воскресную школу. 24 мая 1895 г. ДП ответил московскому обер-полицеймейстеру, что Н.Е.Вернадская «не навлекла на себя лично подозрения в политической неблагонадежности и потому со стороны Департамента не встречается препятствий к разрешению ей открыть в г.Москве воскресную школу, но ввиду имеющихся неблагоприятных сведений об ее муже надлежит учредить внимательное наблюдение за направлением преподавания в школе и за составом преподавателей» [2. Л.15].

«Благонадежность» граждан империи проверялась тотально, в частности при организации экспедиций, создании новых научных общественных организаций. Так, 25 апреля 1896 г. уфимский губернатор запрашивал московского обер-полицеймейстера о политической благонадежности и моральных качествах членов Московского общества испытателей природы (МОИП) — В.И.Вернадского, В.Д.Соколова и О.А.Федченко, направляемых этим обществом в Уфимскую губ. с научной целью [2. Л.19]. В 1898 г. МОО сообщило ДП характеристики на подписавших обращение о создании Русского горного общества и определило Вернадского как «сторонника взгляда необходимости политического воспитания студентов, с какой целью хотел составить каталог книг, чтение коих давало бы желаемые результаты» [8].

Наблюдение за связями между либеральной профессурой и революционно настроенным студенчеством было одним из важнейших направлений деятельности полиции и охранки. 13 января 1897 г. ДП сообщил московскому обер-полицей-



В.И.Вернадский в 1888 г. и Н.Е.Вернадская в 1886 г. Вскоре они окажутся под полицейским надзором.

стеру, что проживающая за границей бывшая студентка Высших женских курсов М.Н.Тихонович, в 1892 г. уже привлекавшаяся к дознанию, ведет переписку через своего брата, получающего корреспонденцию по адресу: «Москва. Минералогический кабинет. В.И.Вернадскому для передачи» [2. Л.24—24об]. Окончивший Харьковский университет в 1897 г. Николай Николаевич Тихонович (1872—1952) [9] был известен ДП своей причастностью к Фонду вольной русской прессы. Однако лично ни в чем «подозрительном» не замеченный, он продолжал заниматься по геологии и минералогии в Московском университете под руководством Вернадского. ДП просил выяснить своих московских коллег «характер отношений» учителя и ученика. И хотя никакой компрометирующей Вернадского и Тихоновича информации на этот раз собрать не удалось, 26 марта 1897 г. исполняющий должность московского полицеймейстера полковник Д.Ф.Трепов отметил, что Вернадский своей деятельностью уже не раз обращал на себя внимание ДП.

Внимание охранки к фигуре Владимира Ивановича было постоянным и особенно усилилось в 1903 г., когда корреспонденция ученого и его близких друзей и знакомых стала регулярно перлюстрироваться. В это время Наталья Егоровна уже числилась как «политически неблагонадежная, состоящая под надзором полиции» [2. Л.32], и в делах охранки сохранился целый ряд перлюстрированных писем к ней ее мужа.

Дом Вернадских в Москве, а они жили тогда в университетской квартире, находился под постоянным наблюдением полиции. «Благодаря» этому мы можем существенно расширить представления об участии Владимира Ивановича и его окружения в событиях 1905 г. Как известно, на гребне революционной волны в марте 1905 г. университеты по распоряжению правительства были закрыты, а высочайший указ от 16 апреля угрожал увольнением профессоров и студентов, если спокойные занятия не начнутся осенью того же года. В период, непосредственно предшествующий указу, охранка накопила богатый материал о связях профес-

сора Вернадского и «революционных элементов». Так, пристав 2-го участка Тверской части сообщал в МОО 12 апреля 1905 г., что в квартире профессора Вернадского во флигеле Московского университета часто собираются «пожилые мужчины, переодетые студенты и даже гимназисты» — до 20 человек. 28 апреля 1905 г. он же доносил, что 27 апреля, в течение всего дня, квартира Вернадского посещалась «одиночными лицами, по видимому интеллигентными», которые «собирались от 4 до 6 человек одновременно». Пристав точно определил, что «квартира Вернадского <...> служит местом для постоянных собраний» и, несмотря на то, что она находится на втором этаже, в отдельном флигеле, «в ней по вечерам окна завешиваются совершенно темными занавесками...» [2. Л.45, 47].

«Совершенно секретные» сводки об очередных «сходках» на квартире Вернадского поступали все лето 1905 г. 3 июля пристав сообщал об одной из них: «Сходки в квартире Вернадского, как я сообщал ранее, ПРОИСХОДИЛИ ЧАСТО. Я слышал, что правление университета за эти сходки просило Вернадского очистить квартиру. Вернадский все время жил на даче и как только приехал в Москву сейчас же устроил сходку» [2. Л.45—46об]. К февралю 1906 г. МОО точно установило, что революционным собраниям студенчества в стенах университета способствует помощник ректора Вернадский. Он участник «освободительного движения», констатировала охранка, а его сын — арестован.

Большой комплекс документов МОО связан с общественной деятельностью в годы первой русской революции сына Вернадского — будущего известного историка Георгия Владимировича Вернадского (1887—1973) [10]. Еще в гимназические годы обнаружилось, что Вернадский-младший так же глубоко

ко интересуется общественно-политическими проблемами жизни России, как и его отец: он последовательно перепробовал традиционный для интеллигенции тех лет набор «исканий» — кружок «самоусовершенствования», «хождение» к Л.Н.Толстому в Ясную Поляну, дискуссии с социал-демократами.

В первый студенческий год (1905) Георгий Вернадский и его друзья активно участвовали в кампании помощи голодающим (зимой 1905/06 гг.), сотрудничали в Крестьянском союзе. 12 ноября 1905 г. Вернадский-старший записал в дневнике: «Разговор с Гулей (Георгием. — М.С.). Увлечен Крест[ьянским] союзом. Хочет ехать пропагандировать идею союза. Охвачен увлечением и движением. «Земля и воля» — явилось кличем — и рассудок отходит на задний план. Есть ли путь для остановки движения? Или чаша должна быть испита до конца?» [11. Оп.2. Д.4. Л.132об].

Опасения за судьбу сына не были напрасны. 31 января 1906 г. за подписью начальника Московского губернского жандармского управления (МГЖУ) генерал-лейтенанта Черкасова в Московское охранное отделение под грифом «секретно» ушла следующая бумага: «Департамент Полиции от 27-го текущего января за № 780 по 7 Делопроизводству, по приказанию министра внутренних дел, просит объявить профессору Московского университета Вернадскому, что сын его Георгий арестован за участие его в противоправительственной пропаганде среди крестьян в столовых, открытых Вернадским в Моршанском уезде в помощь голодающим» [12]. В действительности Георгий был арестован 20 января, и в тот же день его отец направил телеграмму непосредственно министру внутренних дел П.Н.Дурново: «Столовые организованные мною помощи голодающим Моршанском уезде близ моего имени полицией закрыты. Заведывавший делами мой

сын и студент Ильинский а также управляющий Попов арестованы увезены Моршанск. По глубокому моему убеждению все основано на неправильном толковании обязанностей местными властями. Прошу Вашего распоряжения возможно скором расследовании иначе разрушится начатое неотложно необходимое крупное дело помощи голодающим крестьянам Профессор Московского Университета Вернадский» [11. Оп.3. Д.1956а. Л.1].

Не полагаясь на официальные правительственные инстанции, 21 января Вернадский отправил еще одну — уже неформальную телеграмму, отчаянный тон которой необычен для его корреспонденции и наглядно демонстрирует меру волнения за сына. Своему старому приятелю, а теперь влиятельному чиновнику МВД С.Е.Крыжановскому, Вернадский писал: «Вчера Вернадовке арестованы старик управляющий и мой сын юноша Георгий. Увезены Моршанск. Устраивали столовые голодающим. Ничего политического не было. Тамбовской губернии теперь полный произвол властей. Губернатора нового нет. Старый Лауниц безумствует. Прошу тебя воздействовать на местные власти. Два раза телеграфировал Лауницу без ответа. Телеграфировал вчера Дурново. Большое дело помощи бездумно разрушено. Распущенные власти могут исклечить жизнь сына. Если можешь помоги. Вернадский» [11. Оп.3. Д.1966а. Л.1]. Вслед за этим Вернадский выехал в Петербург, где 1 февраля 1906 г. встретился с Крыжановским. Старый друг немедленно помог: «Он очень сердечно и хорошо ко всему отнесся», — сообщал ученый жене [11. Оп.7. Д.51. Л.1об]. Впоследствии Вернадский вспоминал, что Крыжановский «через Дурново быстро освободил Георгия. Он до известной степени поручился за него — “грехи молодости”, — что в действительности и было» [11. Оп.2. Д.31. Л.85]. Параллельно Вернадскому обещали вмешать-

ся в «Моршанское дело» сам премьер-министр С.Ю.Витте и министр внутренних дел П.Н.Дурново, с которыми Вернадский встречался 1 февраля; в письме жене Вернадский констатировал: «Георгий выпущен, кажется, вне всяких правил с полным нарушением бюрократизма, по-видимому, на мою личную ответственность» [11. Оп.7. Д.51. Л.3].

После освобождения Георгия родители отправили его подальше — в Германию, где он провел весну-лето 1906 г. Однако, вернувшись в Россию, он сразу же опять включился в антиправительственную деятельность, и 28 января 1907 г. его вновь арестовали за распространение агитационной литературы партии народной свободы на Смоленском бульваре в Москве. На этот раз он был освобожден еще быстрее — согласно «телефонному распоряжению» помощника начальника Особого отдела. В архиве охраны остался его членский билет №10 540-й московской городской группы кадетов [13].

В течение последующих лет Георгий Вернадский продолжал активную политическую работу в кадетской партии и в документах ДП и МГЖУ его имя будет встречаться регулярно — то как одного из руководителей (в 1909 г.) Кружка прогрессивной молодежи Москвы, занимавшегося распространением книг среди крестьян и пропагандой общественно-экономической организации в деревне, то в связи с революционной деятельностью его друга Михаила Карповича\*, в те годы активного эсера, многократно арестовывавшегося в Москве, где он жил на одной квартире с Г. и Н.Вернадскими, С.С.Ольденбургом, Н.Д.Шаховской (д.№5 Снегиревой по Полуэктову пер., кв.19), то, наконец, в связи с общест-

венной деятельностью его жены Нины Владимировны, личностью которой постоянно интересовалось Тульское ГЖУ, наводившее своих московских коллег на обыски в ее доме (д.5/50 Нейгарда по Арбату, кв.56).

Большой массив документов ОО ДП и МОО связан со знаменитой университетской историей 1911 г. Напомним, что 27 января 1911 г. в Московском университете состоялась очередная студенческая сходка, на которую по распоряжению правительства был направлен наряд полиции, передавший распоряжение поставить ректорат и Совет университета под контроль градоначальника Москвы. В ответ на эту меру, нарушавшую университетскую автономию, ректор А.А.Мануйлов, его помощник М.А.Мензбир и проректор П.А.Минаков подали в отставку, считая для себя унизительным находиться под надзором полиции. Их действия активно поддержали многие профессора, в том числе В.И.Вернадский. В результате к 20 февраля Московский университет потерял из своего преподава-

тельского состава 108 человек, из них 25 профессоров (28% от общего числа профессоров) и 74 приват-доцента (27%). Вернадский посвятил этому событию несколько статей — «Разгром», «1911 год в истории русской умственной культуры», опубликованных в газете «Русские ведомости» и «Ежегоднике газеты «Речь» на 1912 г.» [14].

Не будем углубляться в детали, которые уже не раз привлекали к себе внимание. Скажем только, что московская охранка имела подробные сведения о ходе событий. На протяжении января—февраля 1911 г. агенты охраны «Зоя», «Васильев», «Петухов» интенсивно, практически каждодневно, поставляли агентурную информацию о положении в университете.

Было заведено специальное дело «О профессорах и приват-доцентах, подавших прошение об увольнении от службы» [15. Д.224]. 4 марта 1911 г. председатель комиссии личного состава и внутреннего распорядка Государственного Совета извещил В.И.Вернадского об увольнении; 3 мая 1911 г. исполняющий обя-



В.И.Вернадский со своими учениками, сотрудниками кафедры минералогии Московского университета В.В.Карандеевым, П.К.Алексаком (сидят), Г.И.Касперовичем и А.Е.Ферсманом (стоят). 1911 г.

\* Карпович Михаил Михайлович (1887—1959) — историк, с 1917 г. в США — секретарь посла России в США Б.А.Бахметева, профессор русской истории в Гарварде, главный редактор «Нового журнала».

занности помощника ректора Московского университета историк М.К.Любавский сообщил ему о необходимости незамедлительного освобождения «казенной квартиры» к 15 мая.

Правительственные репрессии сильно затронули студенчество. Воспреещение жить в Москве за студенческие беспорядки в январе—феврале получили 232 студента. Одной из жертв полицейского произвола стал и ученик Вернадского Александр Васильевич Казаков, занимавшийся обработкой коллекций фосфоритовых месторождений минералогического кабинета московского университета; на него было заведено дело в Московской охранке. Материалы хорошо показывают, что научные школы создавались в России начала XX в. не только на университетской скамье — их объединяла общая демократическая идеология профессоров и студентов.

Казаков был арестован 17 марта 1911 г. по обвинению

в участии в студенческой социал-демократической фракции, в забастовке, агитации и «ораторствовании» на сходках. Во время обыска у него было изъято много писем, а также курс лекций Вернадского «Минералогия» с корректурными знаками. 2 апреля 1911 г. Вернадский направил московскому градоначальнику А.А.Адрианову «прошение», в котором характеризовал А.В.Казакова как «человека очень выдающегося, работающего и далекого от всяких студенческих беспорядков». После окончания им опытной работы «Материалы к исследованию группы палыгорскита» Вернадский представил эту работу в Академию наук, где она стала печататься в ее «Известиях». «Ввиду всего вышеуказанного, — писал Вернадский, — позволяю себе просить Ваше Превосходительство, обратить внимание на дело этого талантливого, многообещающего человека, сколько знаю, всегда стоявшего в стороне от всякой политики.

Не произошла ли какая-нибудь ошибка в связи с его арестом?» [15. Д.684. Л.20—21]. Письмо Вернадского, а также ходатайство Московского университета, сделали свое дело, и 8 апреля Казаков был освобожден «без дальнейших последствий».

После 1911 г. и ухода Вернадского из Московского университета нам не удалось обнаружить документов, свидетельствующих о слежке за выдающимся ученым. Возможно, здесь сыграло роль то обстоятельство, что в 1912 г. он был избран ординарным академиком Императорской Академии наук, переехал жить в Петербург и его «дело» вслед за ним отправилось в Петербургское охранное отделение, материалы которого, как известно, плохо сохранились. Но возможен и другой ответ — активная политическая деятельность Вернадского после 1912 г. явно сходила на нет, а помыслы ученого все более сосредотачивались на создании биосферной концепции Вселенной. ■

## Литература

1. Волков В.А., Куликова М.В. Российская профессура «под колпаком» у власти // Вопр. истории естествознания и техники. 1998. №2. С.74.
2. ГАРФ. Ф.63. 1890. Д.961.
3. Аксенов Г.П. Сила братства // Природа. 1988. №2. С.82—93.
4. Каганович Б.С. Люди и судьбы: Д.И.Шаховской, С.Ф.Ольденбург, В.И.Вернадский, И.М.Гревс по их переписке 1920—1930-х гг. // Звезда. 1992. №5/6. С.161—170.
5. Шаховской Д.И. Письма о братстве / Публ. Ф.Ф.Перченка, А.Б.Рогинского, М.Ю.Сорокиной // Звенья: Историч. альманах. М.; СПб., 1992. Вып.2. С.174—318.
6. ГАРФ. Ф.63. 1895. Д.466. Л.2.
7. Вернадский В.И. Письма Н.Е.Вернадской / Сост. Н.В.Филиппова. Т. 1—3. М., 1988—1994.
8. ГАРФ. Ф.63. 1898. Д.480. Л.11—11об.
9. Репрессированные геологи: Биографические материалы. М.; СПб., 1995. С.168—169.
10. Сорокина М.Ю. Георгий Вернадский в поисках «русской идеи» // Рос. науч. эмиграция: двадцать портретов. М., 2001. С.330—347.
11. АРАН. Ф.518.
12. ГАРФ. Ф.63. 1906. Оп.26. Д.59. Л.196.
13. ГАРФ. Ф.63. 1907. Оп.27. Д.238. Л.43.
14. Вернадский В.И. Публицистические статьи / Сост. В.П.Волков. М., 1995. С.179—181, 186—199.
15. ГАРФ. Ф.63. Оп.31. 1911.

# Необычная организация покровной ткани скребней

В.П.Никишин

В обширном и разнообразном мире паразитических организмов несколько особняком стоят те, которых в обиходе уже давно называют паразитическими червями, или гельминтами. Группа эта сборная, включает животных нескольких типов, весьма отличающихся по морфологии и экологии. В большинство из них входят как паразитические, так и свободноживущие виды (коловратки, плоские и круглые черви), и только тип скребней (*Acanthocephala*) представлен исключительно паразитирующими организмами (рис.1). По сравнению с другими гельминтами скребни изучены довольно слабо, и это понятно — их видовое разнообразие невелико, да и вызываемые ими акантоцефалезы довольно редкие заболевания животных и тем более человека.

Во взрослом состоянии скребни заселяют только кишечник, обычно тонкую кишку, у всех групп позвоночных животных (у рыб — еще и пилорические отростки). Иногда они, пробуравливая стенку кишечника, проникают в полость тела, но это уже явная патология как для хозяина, так и для самого скребня, который никогда не сможет оставить потомства. Личинки развиваются в ракообразных и насекомых (рис.2), причем с весьма высокой специ-



**Владимир Павлович Никишин**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории популяционной генетики Института биологических проблем Севера Дальневосточного отделения РАН. Область научных интересов — функциональная морфология паразитических червей, эволюция тканевой организации низших многоклеточных.

фичностью: среди нескольких близкородственных видов промежуточных хозяев тем или иным видом скребней заражается только один. Так, промежуточным хозяином скребня *Moniliformis moniliformis siciliensis* может быть только жук чернотелка, *M.m.moniliformis* — еще и американский таракан, *Macracanthobryncbus hirudinaceus* — майский жук. Понятно, почему люди так редко страдают акантоцефалезами, ведь для этого по крайней мере надо проглотить таракана или жука.

Морфология скребней на первый взгляд довольно однообразна. Обычно это небольшие черви длиной до одного-двух сантиметров, и лишь некоторые виды достигают больших размеров. Например, скребень-великан *M.hirudinaceus* (паразит свиньи, а иногда и человека) вырастает до полуметра и более. Ланцетовидное тело скребней от-

четливо делится на две части (рис.3). Передняя (пресома) — состоит из относительно большого и подвижного хоботка, вооруженного крючьями (их количество и расположение служат основными таксономическими признаками), а также из небольшой шейки. В задней части (метасоме) размещены органы половой системы и выделительной (в случае ее наличия). Пищеварительный тракт отсутствует. Скребни осмотрофы, т.е. питаются, всасывая необходимые вещества всей поверхностью тела. Свообразно устроен и эпителий — не из отдельных клеток, как у большинства многоклеточных животных, а в виде сплошного цитоплазматического пласта, в котором ядра (кстати, их число ограничено, что также служит систематическим признаком), как и у обычных эпителиальных клеток, располагаются в базальной части. Получается,

© В.П.Никишин





Рис.1. Вскрытый участок кишечника утки-шилохвостки (*Anas acuta*), пораженный зрелыми самками скребней (*Filicollis apatis*). Хоботки скребней глубоко внедряются в стенку кишечника и затем разрастаются, образуя на внешней поверхности кишки выросты в виде луковицы (показано стрелками).

Фото Г.И.Атрашкевича

что весь покров скребней образован единой многоядерной клеткой (симпластом), которой свойственны функции не только «нормального» эпителия, входящего в состав кожного покрова (защита, опора, транспорт, секреция и т.д.), но и пищеварительных эпителиев (всасывание, секреция ферментов и т.д.). Чтобы подчеркнуть столь необычную организацию и многофункциональность пограничной тка-

ни скребней, для нее был принят специальный термин «тегумент» [1] (см. рис.3).

У других паразитических червей, а именно у сосальщиков (Trematoda) и ленточных червей (Cestoda), пограничная ткань также представлена тегументом, но организованным совсем иначе. У этих гельминтов только дистальные части эпителиальных клеток объединены в сплошной пласт, а базальные,

содержащие ядра и большую часть органелл и включений, погружены глубоко под слой субповерхностных мышц и не часто (обычно на стадиях интенсивного роста организма) связаны между собой цитоплазматическими мостиками. Конструкции, когда клетка связана друг с другом фрагментарно, а их ядродержащие части представляют собой отдельные «карманы», аналогичные клеточным телам,

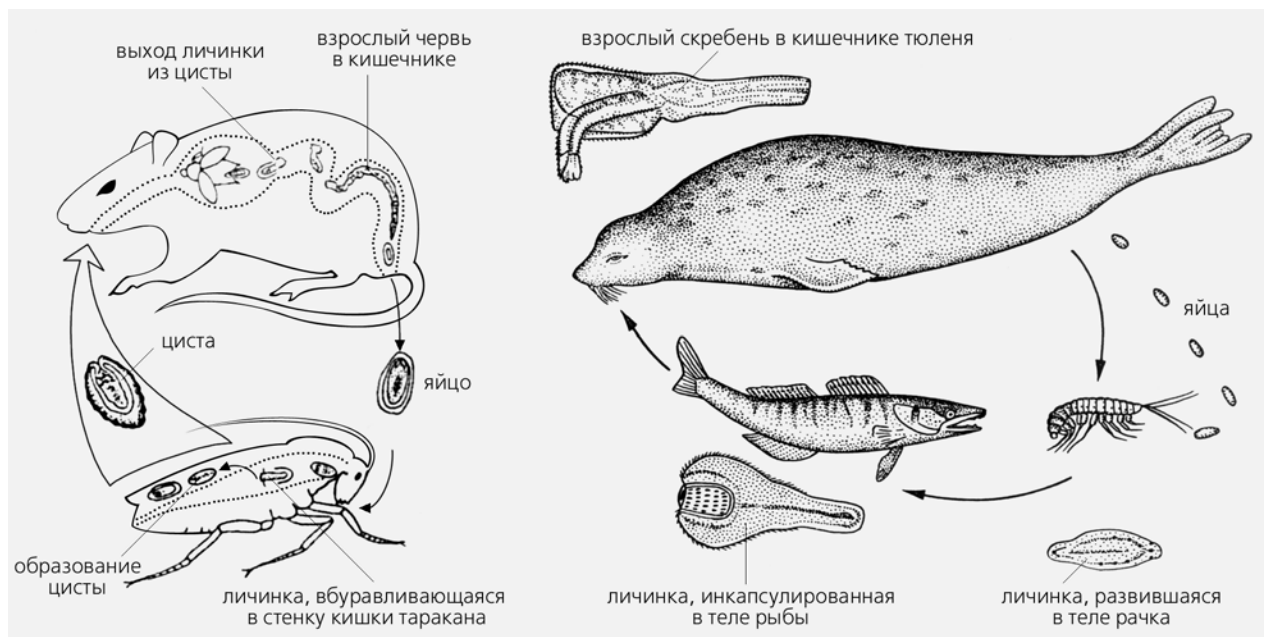


Рис.2. Жизненные циклы двух видов скребней. Один (из рода *Moniliformis*) паразитирует в кишечнике грызунов (слева), другой (*Corynosoma strumosum*) — тюленей.

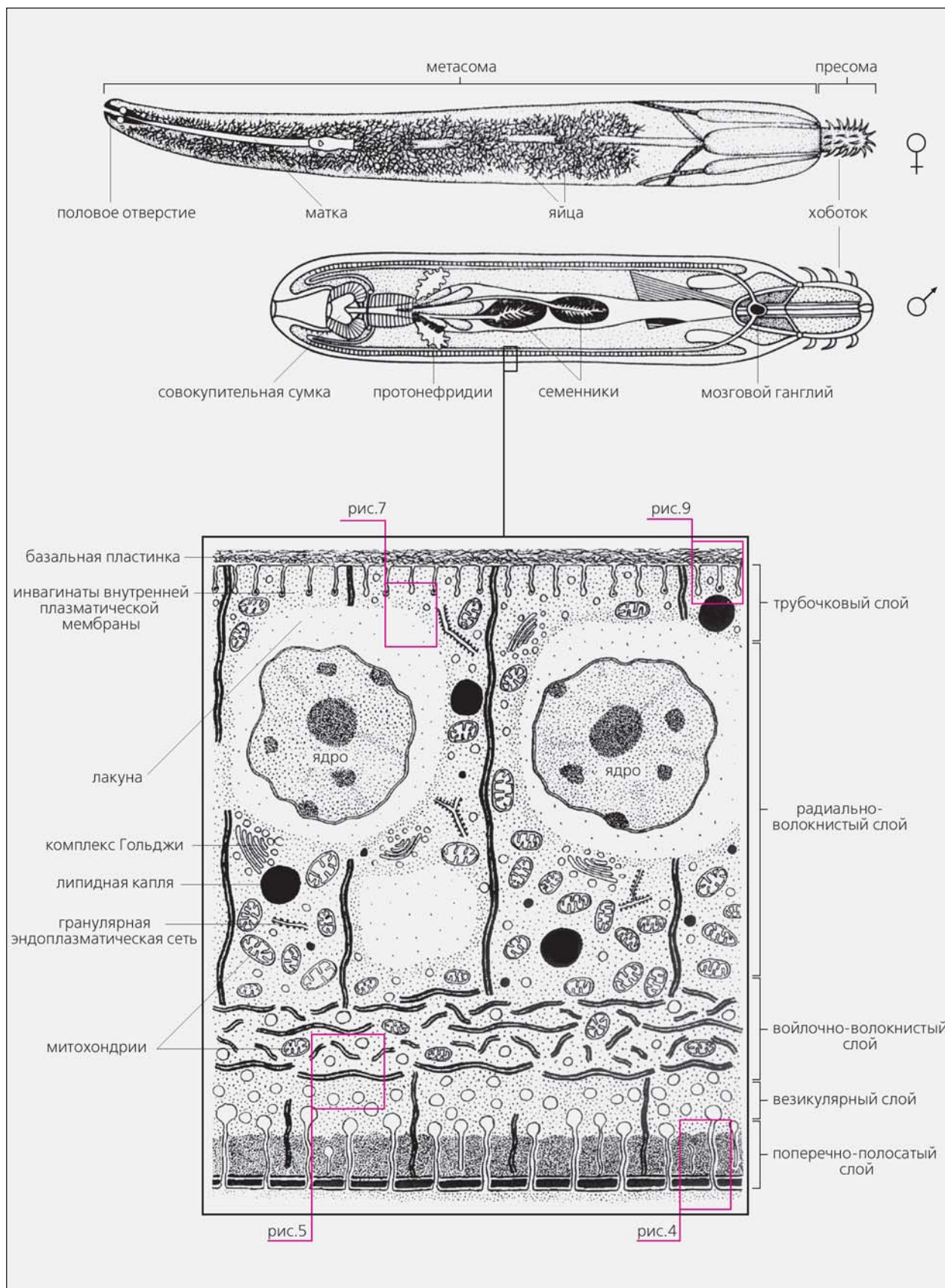


Рис.3. Схема строения тела скребней и отдельно тегумента метасомы.

называются синцитиями. Таким образом, тегументом обозначают две совершенно разные по организации пограничные ткани: у скребней это симпласт, а у плоских червей — синцитий. Кстати, впервые термин «тегумент» был введен при исследовании покровной ткани именно ленточных червей.

Зачем же понадобилось объединять эпителиальные клетки в единое целое столь кардинальным способом, и чем не устраивала паразитических червей клеточная конструкция эпителия? Разумеется, возникновение тегумента было напрямую связано с паразитическим образом жизни его обладателей, а точнее с необычными условиями среды обитания. Не так уж важно в этом случае, имели ли предки ныне живущих цестод, трематод или скребней пищеварительный тракт или нет, поскольку освоение новой среды открыло принципиально новые возможности питания. Вместо формирования громоздкого пищеварительного аппарата и развития инструментов, необходимых для поиска и захвата пищи, в новых условиях существования можно было просто воспользоваться пищеварительной системой хозяина и всасывать уже готовые или почти готовые продукты.

Другим необходимым условием возникновения тегумента было отсутствие у низших многоклеточных, к числу которых относятся предки нынешних гельминтов, сосудистых систем, доставляющих необходимые вещества к разным участкам тела. Конечно, существует немало механизмов переноса тех или иных субстанций сквозь клеточную стенку (цитоплазматическую мембрану), однако действуют они довольно медленно и в большинстве случаев лишь гармонично дополняют работу сосудистых систем. Частичная утрата цитоплазматических мембран и превращение клеточного эпителия в симпластический или синцитиальный, естественно, облегчает задачу, поскольку для

транспорта используются внутриклеточные системы (микротрубочки, эндоплазматический ретикулум и т.д.). Более того, у скребней, например, в толще тегумента развита система своеобразных каналов — лакун.

И наконец, отказаться от клеточного строения эпителия гельминтов вынудила весьма агрессивная среда обитания — организм хозяина, чутко реагирующий на вторжение, будь то паразит или обычная заноза. И если в отношении питания или транспорта питательных веществ образ жизни привел к определенному упрощению организации паразитических червей, то для защиты от агрессивного ответа хозяина на вторжение у них выработались весьма совершенные и разнообразные механизмы. Несомненно, один из них — возникновение тегумента, благодаря чему гельминты получили возможность оперативно и адекватно отвечать на нежелательные для паразита реакции хозяина всей поверхностью тела.

Справедливости ради замечу, что не у всех паразитических червей покровная ткань трансформировалась в тегумент. У многих нематод (*Nematoda*) эпидермис образован отдельными, правда, очень немногочисленными клетками [2]. Но и у некоторых представителей этого класса в процессе личиночного развития изначальный клеточный эпидермис становится синцитиальным. И это при том, что все нематоды защищены мощной и сложно устроенной кутикулой, которая образуется в результате секреции ее материала эпителиальными клетками (или синцитием). У плоских червей (к коим относятся трематоды и цестоды) и у скребней такой кутикулы нет.

Тегумент плоских червей иногда называют погруженным эпителием, чем подчеркивают одну из основных его особенностей — расположение клеточных тел под слоями кожной мускулатуры. Биологический смысл явления очевиден: в этом случае

наиболее важная часть клеток, содержащая ядра и основную долю клеточных органелл и включений, надежно защищена от механических воздействий организма хозяина поверхностным слоем цитоплазмы, базальной пластинкой и мышечными слоями. Считается, что такая конструкция в эволюционном отношении более прогрессивна, чем, скажем, клеточный эпидермис низших турбеллярий, располагающийся над базальной пластинкой и слоями кожной мускулатуры. Нечто похожее наблюдается и у нематод, у которых основные порции цитоплазмы эпидермальных клеток вместе с большей частью клеточных органелл, в том числе и ядрами, располагаются в так называемых гиподермальных валиках, погруженных глубоко под кожную мускулатуру.

У скребней ничего подобного нет, и их симпластический тегумент покоится над базальной пластинкой и слоями кожной мускулатуры. Однако для защиты от механических повреждений у них развились достаточно эффективные и отсутствующие у других паразитических червей структуры. Во-первых, это покровный комплекс из поверхностной цитоплазматической мембраны и расположенных непосредственно под ней одной-двух плотных пластинок, который формируется еще на стадии эмбриона и в дальнейшем не меняется (рис.4). Вплотную к внутренней стороне покровного комплекса примыкает вторая, наиболее укрепленная защитная система — интрасимпластное уплотнение — мощный (до нескольких микрометров толщиной) слой плотного материала [3]. Прежде, а иногда и сейчас, интрасимпластное уплотнение ошибочно считали кутикулой. На самом деле это не так, поскольку располагается оно не на поверхности, а внутри эпидермиса (покровного симпласта), формируется, когда скребень попадает в организм окончательного хозяина, и не подвер-

гается при линьке. Наконец, еще глубже находится самая объемная, третья линия обороны — система горизонтальных волокон, ориентированных в продольном или кольцевом направлении (рис.5). Эти волокна образуют войлочно-волоконистый (или просто войлочный) слой тегумента, степень развития которого зависит от окончательного хозяина. Например, у рыбьих скребней эти волокна менее многочисленны и неупорядочены, поскольку пищеварительный тракт рыб оказывает на паразитов меньшие механические воздействия, чем, скажем, кишечник околородных птиц. Волокна войлочного слоя у птичьих скребней упорядочены и организованы в несколько (до пяти) субслоев. Разумеется, все эти образования выполняют не только защитную функцию, но и опорную [4], за которую у многих других беспозвоночных ответственна кутикула.

Казалось бы, столь действенные защитные системы должны препятствовать движению всасываемой пищи в глубь тегумента для дальнейшей переработки. Без сомнения, они и препятствуют, и поэтому эволюция снабдила скребней великолепным механизмом, позволяющим не только преодолеть ею же созданные барьеры, но и многократно увеличить всасывающую поверхность.

У цестод, как известно, на поверхности тегумента формируются специализированные микроворсинки (микротрихии), выполняющие помимо всасывания и другие функции. Но у цестод нет покровного комплекса и интрасимпластного уплотнения, поэтому такая конструкция их вполне устраивает. У скребней же весь поверхностный отдел тегумента пронизан каналами, открывающимися на поверхности червя и слепо заканчивающимися в глубине тегумента. (Благодаря этим каналам поверхностный отдел тегумента назван поперечно-полосатым, или просто

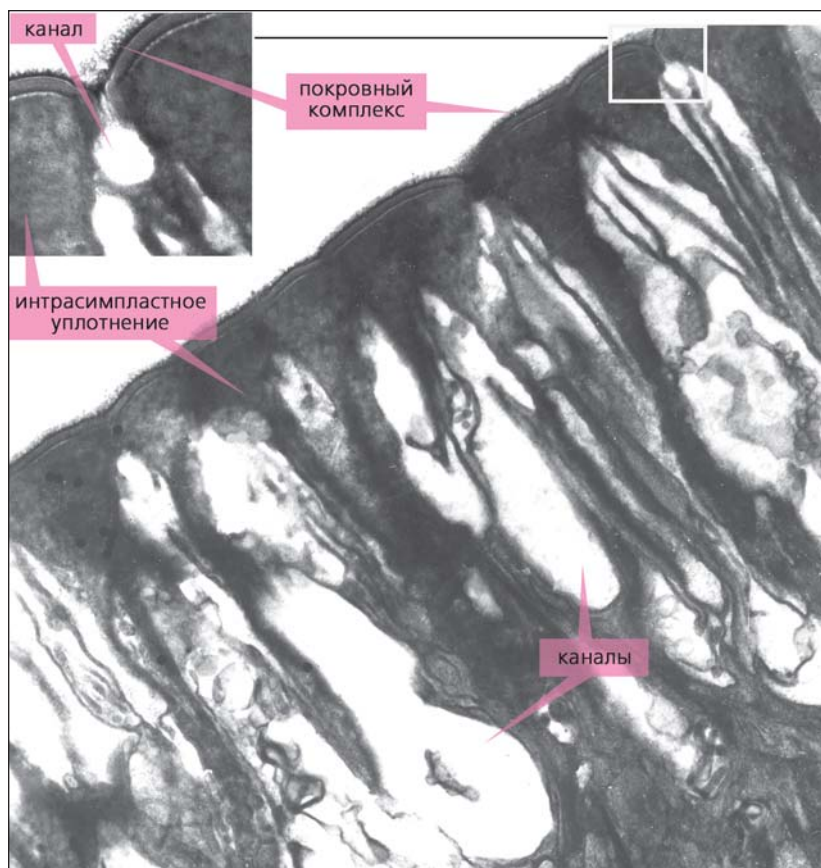


Рис.4. Поверхностная часть тегумента метасомы половозрелого скребня *Filicollis anatis*. На вставке — фрагмент покровного комплекса при большем увеличении. Под покровным слоем, образованным наружной цитоплазматической мембраной и двумя плотными пластинами, располагается интрасимпластное уплотнение, пронизанное многочисленными каналами. Увел. 24 000, на вставке — 58 000.

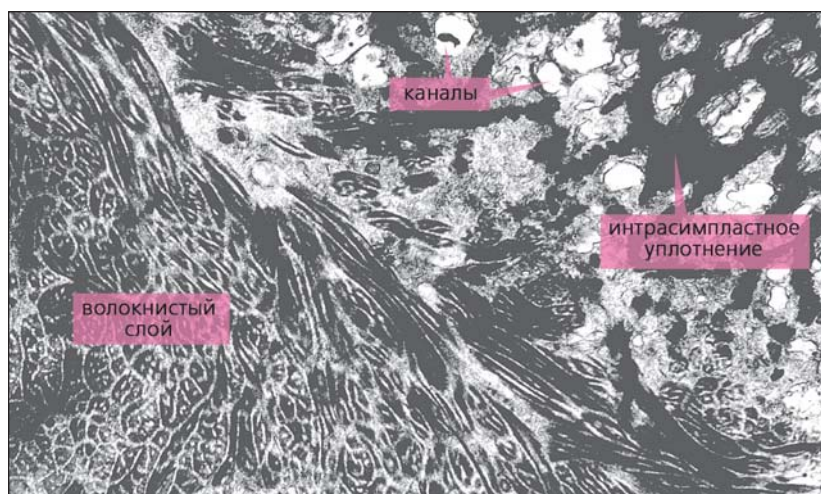


Рис.5. Дистальная часть войлочно-волоконистого слоя тегумента метасомы скребня *Polymorphys magnus*. Заметно упорядоченное расположение волокон, каждое из которых состоит из нескольких субъединиц. В поперечно-полосатом слое видны расширенные основания каналов, между которыми находится интрасимпластное уплотнение. Увел. 12 800.

полосатым, слоем). Причем заканчиваются каналы значительно глубже интрасимпластного уплотнения и обязательно в виде расширенных пузырьков. Стенки каналов и соответственно концевых пузырьков образованы только цитоплазматической мембраной и не имеют покровного комплекса, поэтому ничто не мешает перемещению всасываемых субстанций в глубь тегумента. Что же касается площади поверхности цитоплазматической мембраны, через которую осуществляется питание червей, то, по разным оценкам, оно может достигать 20-, 40- и даже 60-кратного уве-

личения в зависимости от степени ветвления каналов, а также вида и экологии скребня. Надо сказать, что функции каналов не ограничиваются питанием, но об этом чуть позже.

На поверхности тегумента у скребней есть и микроворсинки, но очень короткие, и развиваются они только в период личиночного развития, когда червь находится в организме промежуточного хозяина (рис.6). (В этот период в тегументе еще нет интрасимпластного уплотнения, однако система каналов в поверхностном отделе тегумента, а также покровный комплекс уже сформировались.) Вершинки

микроворсинок постепенно отделяются и входят в состав окружающей личинку цисты. Незадолго до завершения личиночного развития микроворсинки уже целиком отделяются от тегумента и в течение дальнейшей жизни скребней на поверхности тегумента больше не развиваются [5].

Оригинальной особенностью тегумента скребней является не имеющая или почти не имеющая аналогов в животном мире транспортная система, о которой уже вскользь упоминалось. Речь идет о лакунах — системе каналов, сосредоточенных в базальной половине тегумента и пронизывающих его вдоль и поперек. Строго говоря, это вовсе и не каналы, поскольку не имеют собственных стенок. На электронных микрофотографиях они выглядят как участки цитоплазмы, полностью лишённые органоидов и лишь изредка содержащие немногочисленные включения, главным образом липидные капли (рис.7). До сих пор не ясно, как лакуны сохраняют свою форму и почему органоиды из окружающей цитоплазмы не перемещаются в них?

Сказанным особенностями лакун не исчерпываются. У скребней тегументы метасомы и пресомы на уровне основания шейки разделены особой перегородкой, и в тегументе каждого отдела есть своя лакунная система. Кроме того, введением различных веществ, в том числе и красящих, обнаружена еще одна лакунная система, на этот раз в субповерхностных мышцах, которая сообщается с лакунной системой тегумента метасомы [6]. Это означает, что содержимое лакун может перемещаться при сокращении и расслаблении мышц. Кстати, кожная мускулатура скребней в функционально-морфологическом отношении заслуживает не меньшего внимания, чем тегумент, но это уже другая тема.

Как упоминалось, в число обязательных функций тегумен-

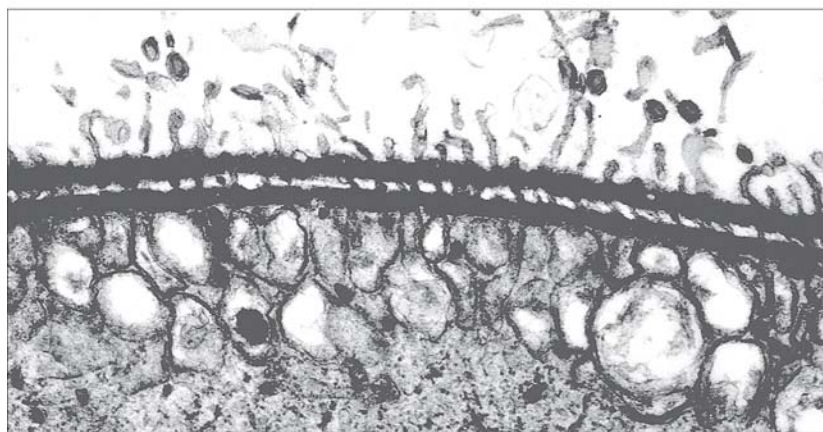
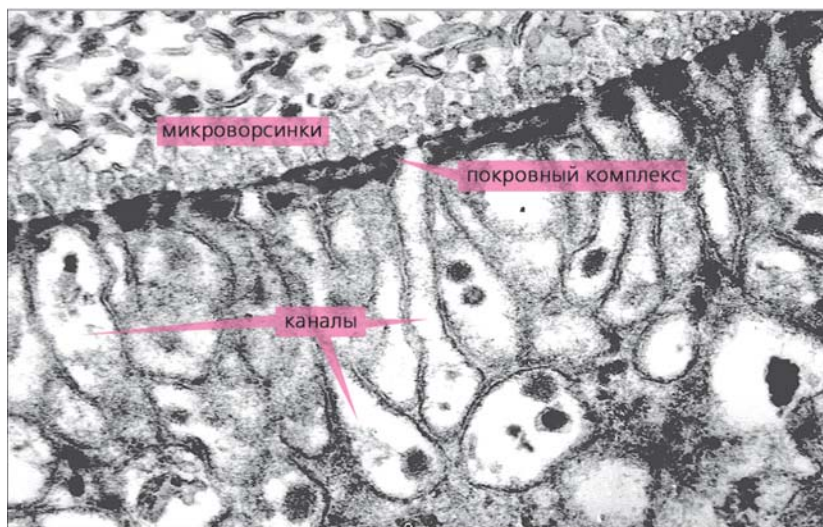


Рис.6. Тегумент личинок *Filicollis anatis* разного возраста. У 50-дневных личинок (вверху) многочисленные микроворсинки имеют «нормальную» внешность, а у 60-дневных они уплотнены и служат своеобразной арматурой для слоя плотного материала — будущей внутренней части цисты. Увел. 21 500.

та входит выделение, или секреция. Об одном из проявлений этой функции — отделении вершин микроворсинок у личинок скребней (что в сущности не что иное, как секреция по микроапокринному типу) — уже говорилось. Подобное явление достаточно часто встречается в природе, и характерно, например для ленточных червей. Однако тегументу скребней присущи еще, как минимум, два типа секреции, не отмеченных у других животных, в том числе и паразитических. Оба они осуществляются с участием каналов поперечно-полосатого слоя. Один из них (тоже упомянутый) наблюдается в конце личиночной стадии, когда разово и быстро выделяется плотный материал (его состав пока не исследован), образующий на поверхности личинки сплошной слой, пронизанный микроворсинками. Впоследствии этот слой вместе с микроворсинками отделяется от тегумента и формирует внутреннюю часть цисты [5] (см. рис.6).

Секреция другого типа — выделение липидной субстанции, образующей на поверхности тегумента мощный электронноплотный слой; происходит это в пресоме у большинства взрослых скребней, паразитирующих в окончательном хозяине [7] (рис.8). Возможно, липидный слой служит своеобразной смазкой, которая облегчает скребню внедрение в ткани хозяина, или защищает паразита от отторжения.

Но и это еще не все. Например, без секреции тегументом пресомы ферментов, разрушающих ткани хозяина, червям было бы трудно или даже невозможно закрепиться в каком-либо участке кишечника. Тегумент метасомы также выделяет на свою поверхность ферменты, но уже другие, участвующие в переваривании пищи. Однако эти и некоторые другие виды секреции уже не столь уникальны, поскольку встречаются у других паразитических червей.

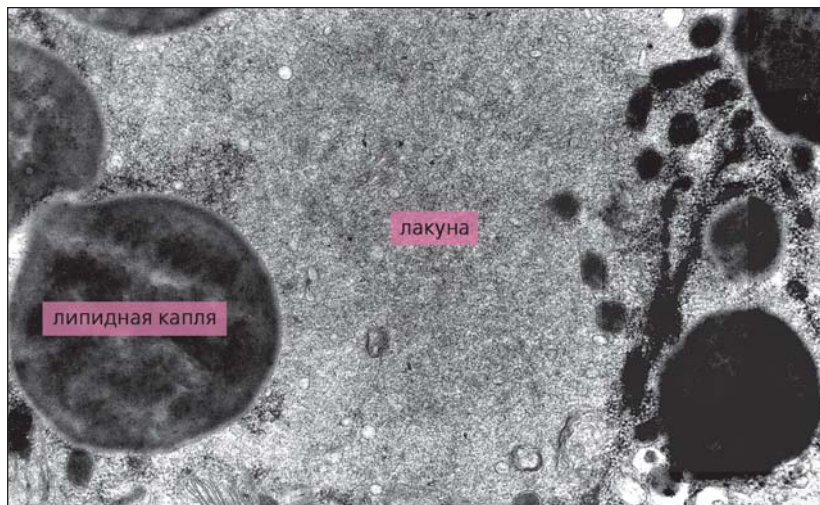


Рис.7. Фрагмент лакуны, окруженный липидными каплями, митохондриями и волокнами, из внутренней части тегумента метасомы зрелой личинки скребня *Polymorphys magnus*. Увел. 15 400.

Уникален тегумент скребней и по сложности строения. Помимо уже упомянутых слоев — кровяного комплекса, поперечно-полосатого (пронизанного каналами интрасимпластного уплотнения), везикулярного (состоящего из расширенных окончаний каналов), войлочного (образованного многочисленными волокнами), радиально-

волокнистого (своеобразного метаболического центра, в котором перерабатываются поглощенные поверхностью субстанции и откладываются запасные вещества) — есть еще так называемый трубчатый слой (см. рис.3). Он образован многочисленными выростами внутренней цитоплазматической мембраны тегумента, направленными в его

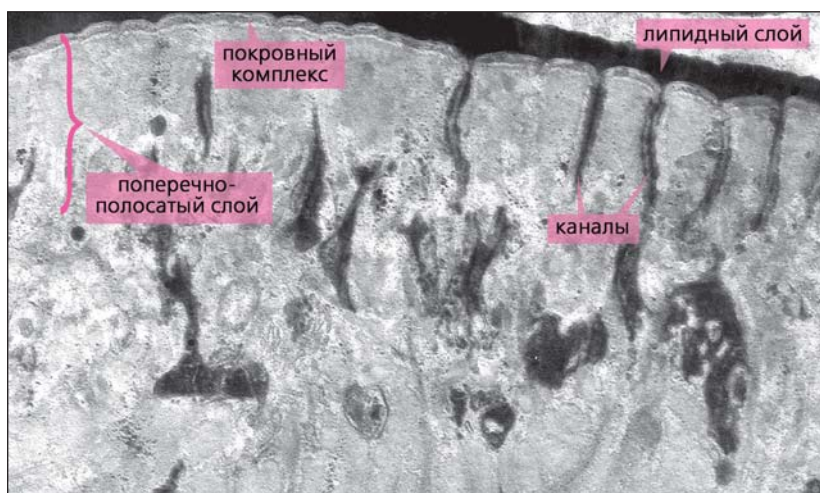


Рис.8. Тегумент пресомы скребня *Polymorphys magnus*. Поверхность тегумента образована покровным комплексом, под которым располагается поперечно-полосатый слой, пронизанный каналами. Интрасимпластное уплотнение заметно слабо. Каналы заполнены тем же плотным материалом, из которого образован липидный слой на поверхности. Увел. 28 000.

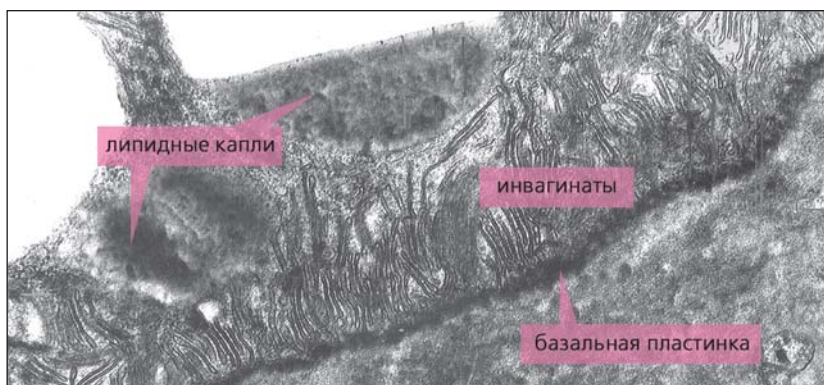


Рис.9. Трубочковый слой тегумента метасомы зрелой личинки скребня *Polymorphus magnus*. Инвагинаты внутренней цитоплазматической мембраны тегумента — радиально ориентированные трубочки — расположены очень плотно друг к другу. В прилегающей цитоплазме видны липидные капли. Увел. 21 000.

толщ и имеющими внешность трубочек (рис.9), благодаря которым он и получил свое название [8]. Вообще подобная организация свойственна всем или почти всем эпителиальным клеткам, а также поверхностным синцитиям других паразитических червей. Однако у скребней элементы этого слоя наиболее многочисленны, а сам слой имеет наибольшую толщину по сравнению с другими эпителиями. Его функциональное значение, как и у других эпителиев, заключается в обмене материалами между тегументом и «полостью» тела, в том числе в транспорте воды и ионов [9].

\*\*\*

В многообразном царстве животных есть лишь одна группа организмов, покровная ткань

которых во многом сходна с тегументом скребней, — коловратки (Rotatoria). Это мелкие (от 0.04 до 2 мм), в основном свободноживущие (пресноводные) черви, обладающие пищеварительным трактом (т.е. питающиеся «нормальным» способом) и ресниччатым коловращательным аппаратом для движения. Удивительно, но именно коловратки имеют симпластический эпителий, аналогичный (часто до мельчайших деталей) тегументу скребней — паразитирующих организмов. Что это? Конвергенция? Маловероятно. Филогенетическая связь? Вполне возможно. Сходство с общим предком? Очень может быть. Среди коловраток ведь есть внутренние (кишечные) паразиты беспозвоночных (преимущественно малощетинковых червей).

В результате паразитирования некоторые коловратки даже утратили коловращательный аппарат. Возможно, именно от таких форм и берет начало отдаленные предки скребней. Тем более что сходство в строении покровов коловраток и скребней дополняется общим планом строения нервной системы (мозговой ганглий и одна пара боковых нервных стволов) и наличием клоаки, куда у скребней выходят отверстия половой и выделительной систем, а у коловраток еще и пищеварительной. Кроме того, симпластический тегумент не менее логично выводится из эпителия турбеллярий, чем синцитиальный — из эпителия плоских паразитических червей. По крайней мере для обеих разновидностей тегумента найдены промежуточные формы эпителия, присущие современным турбелляриям. А может быть, обе группы (коловратки и скребни), учитывая их предполагаемую (и на то есть основания) древность, представляют собой остатки некогда весьма прогрессивного направления в эволюции беспозвоночных? В любом случае загадочное сходство покровов этих, столь различных по образу жизни, животных еще ждет своего изучения. А пока остается констатировать, что еще одной загадкой в мире живой природы стало больше. Разрешима ли она? ■

**Работа поддержана Президиумом Дальневосточного отделения РАН (конкурс 2002 г.). Проекты А-36 и К-8.**

## Литература.

1. Miller D.M., Dunagan T.T. Functional morphology // Biology of the Acanthocephala. Cambridge, 1985.
2. Малахов В.В. Нематоды: строение, развитие, система и филогения. М., 1986.
3. Вельш У., Шторх Ф. Введение в цитологию и гистологию животных. М., 1976.
4. Богоявленский Ю.К., Иванова Г.И. Микроструктура тканей скребней (покровы и нервная система). М., 1978.
5. Nikishin V.P. // J. Parasitol. 1992. V.78. №1. P.127—137.
6. Miller D.M., Dunagan T.T. // Proc. Helminthol. Soc. Wash. 1985. V.52. №2. P.221—226.
7. Taraschewski H. // Adv. Parasitol. 2000. V.46. P.1—179.
8. Никушин В.П. // Паразитология. 2000. Т.24. №2. С.125—143.
9. Куперман Б.И. Функциональная морфология низших цестод: онтогенетический и эволюционный аспекты. Л., 1988.

# Новости науки

## Астрофизика

### «Портрет» Альфы Центавра

Всем известно, что ближайшая к Солнцу звезда — это Альфа Центавра (а точнее — Кентавра). Некоторые знают, что это двойная звезда, оба компонента которой — А и В — весьма похожи на Солнце. Знатоки астрономии вспомнят, что в эту систему входит и третий член — Проксима Центавра, маленький красный карлик, движущийся вдалеке от двух главных звезд и находящийся к нам даже чуть ближе, чем они (Проксима как раз и означает «ближайшая»). Но только профессиональные астрономы знают, что до сих пор эти ближайшие к нам звезды были изучены довольно слабо. Причина в том, что наиболее изощренная астрономическая техника в течение всех предыдущих столетий располагалась в Северном полушарии Земли, а созвездие Центавра находится на южном небе. Но за последние годы в чилийских горах построены лучшие в мире телескопы Европейской южной обсерватории (ЕЮО), которые позволили недавно изучить систему Альфы Центавра так детально, как не изучено ни одно другое светило, кроме Солнца. Это обеспечило прорыв в физике звезд. Оказалось, что наши теоретические представления о внутреннем строении солнцеподобных звезд прекрасно согласуются с наблюдениями. Следовательно, астрономы весьма точно представляют устройство самого Солнца и могут надежно прогнозировать его будущую эволюцию.

Наблюдения звезд Альфы Центавра были проведены с помощью недавно созданного на ЕЮО интерферометра Очень большого

телескопа (VLTI — Very Large Telescope Interferometer)<sup>1</sup>. Основу этого гигантского оптического комплекса составляют четыре восьмиметровых телескопа VLT, уже в полную силу работающие по отдельности<sup>2</sup>. Для их совместной работы в режиме интерферометра уже создана подземная линия оптической связи и система задержки сигнала. В помощь большим телескопам сооружается несколько передвижных малых инструментов, необходимых для равномерного заполнения апертуры и увеличения базы интерферометра, которая достигнет 200 м! В ходе испытания этих вспомогательных телескопов как раз и были проведены наблюдения Альфы Центавра с оптической базой в 16 и 66 м.

Компоненты этой звезды удалены друг от друга, примерно как Уран от Солнца, и обращаются во-

круг общего центра масс с периодом в 80 лет. На небе они разделены углом в 21", поэтому для нового интерферометра не составило труда изучить их по отдельности.

Угловой диаметр звезд А и В Центавра составил  $8.512 \pm 0.022$  и  $6.002 \pm 0.048$  угловой миллисекунды. При расстоянии до них в 4.36 св. года ( $41 \cdot 10^{12}$  км) истинные радиусы звезд составляют соответственно 854 и 602 тыс. км, или  $1.227 \pm 0.005$  и  $0.865 \pm 0.007$  радиуса Солнца. Отметим, что еще ранее, при испытании в режиме интерферометра двух восьмиметровых телескопов (Анту и Мелипаль), разделенных расстоянием в 100 м, был измерен угловой диаметр маленькой Проксимы ( $1.02 \pm 0.08$  угловой миллисекунды) и вычислен ее радиус (0.145 радиуса Солнца). Всю эту работу проделала группа астрономов под руководством П.Кервеллы (P.Kervella; ЕЮО, Чили), Ф.Тевенина (F.Thevenin; Обсерватория Лазурного берега, Ницца, Франция) и Д.Сегрансана (D.Segransan; Женевская обсерватория, Швейцария).

<sup>1</sup> ESO Press Release 05/03. 15 March 2003.

<sup>2</sup> О стадиях строительства VLT см.: Второй «глаз» Очень большого телескопа // Природа. 2000. №4. С.36; Гордость европейской астрономии // Там же. №8. С.42; Открылся четвертый «глаз» Очень большого телескопа // Там же. 2001. №2. С.80.

### Таблица

#### Относительный размер некоторых ближайших звезд.

Параметр	Солнце	α Cen A	α Cen B	Proxima
Возраст, млн лет	4650	4850	4850	4850
Масса	1.000	1.100	0.907	0.123
Радиус	1.000	1.227	0.865	0.145
Светимость	1.000	1.519	0.500	0.000138
Температура, К	5770	5790	5260	3040
Водород	73.7	71.5	69.4	69.5
Гелий	24.5	25.8	27.7	27.8
Тяжелые элементы	1.81	2.74	2.89	2.90

Масса Солнца =  $1.989 \cdot 10^{26}$  кг.

Радиус Солнца =  $6.96 \cdot 10^{10}$  м.

Светимость Солнца =  $3.827 \cdot 10^{26}$  Вт.

Тяжелые элементы — все, кроме водорода и гелия.

Химический состав поверхности звезды указан в массовых процентах.



Знание точного размера звезд (наряду с измеренными отдельно их светимостью, температурой и химическим составом поверхности) позволило рассчитать для них детальные модели внутреннего строения. Независимым тестом для проверки этих моделей стали астросейсмологические данные. Еще в 1962 г. на поверхности Солнца были замечены мелкие сейсмические колебания, дальнейшее изучение которых чрезвычайно продвинуло наши представления о его внутреннем строении. Несколько лет назад подобные колебания были открыты и у звезды Альфа Центавра А, а позже — еще у пяти солнцеподобных звезд. Спектр этих колебаний прямо связан с распределением физических параметров в недрах звезды.

Недавно французский астроном П.Морель (P.Mogel; Обсерватория Лазурного берега) на основе данных астросейсмологии построил теоретические модели компонентов Альфы Центавра, используя которые, он предсказал их радиусы:  $1.230 \pm 0.003$  и  $0.857 \pm 0.007$  радиуса Солнца, соответственно для звезд А и В. Наблюдатели и теоретики поздравляют друг друга: согласие ожидавшихся размеров этих звезд с измеренными оказалось великолепным. Теперь Альфа Центавра не только ближайшая к нам звездная система, но и наиболее изученная среди всех звезд. Самое важное — подтвердилась точность теоретических моделей звезд, подобных Солнцу. На основе этих моделей можно уверенно прогнозировать эволюцию Солнца как в прошлом, так и в будущем.

© В.Г.Сурдин,

кандидат физико-математических наук  
Москва

## Астрономия

### Найден остаток исторической сверхновой

Группа астрономов под руководством Ф.Винклера (F.Winkler; Колледж Мидлбери, США) объединила точные наблюдения с не-

сложной математикой, чтобы оценить видимую яркость взорвавшейся звезды, свет которой достиг Земли почти тысячу лет назад, став, вероятно, самым впечатляющим астрономическим явлением за всю историю наблюдений неба человеком.

1 мая 1006 г. на южном небосводе в созвездии Волка неожиданно загорелась невообразимо яркая звезда, которая наблюдалась на территории Китая, Японии, Египта, Ирака, Италии и Швейцарии. Лишь через несколько месяцев она перестала быть различимой на фоне дневного неба. Современные астрономы давно пришли к выводу, что в 1006 г. на Земле видели вспышку сверхновой — далекая звезда закончила жизнь чудовищным взрывом.

Какой бы яркой ни была сверхновая в XI в., сегодня ее остатки почти не видны. Тем не менее благодаря серии наблюдений на телескопах Межамериканской обсерватории Сьерро-Тололо (Чили) Винклер и его группа обнаружили слабоосветяющуюся водородную оболочку, окружающую место взрыва звезды. Эта оболочка порождается ударной волной от взрыва, которая распространяется по сильно разреженному межзвездному газу. Наблюдения оболочки покрывают период в 11 лет и позволяют измерить смещение по небосводу самых ярких волокон в ней. По спектрам тех же волокон была определена скорость движения ударной волны вдоль луча зрения. По двум проекциям измерена и абсолютная скорость ударной волны. Она оказалась равной 2900 км/с — почти 1% скорости света.

Сравнив эту величину с угловой скоростью общего расширения оболочки, астрономы вычислили точное расстояние от нее (а значит, и от сверхновой) до Земли — 7100 св. лет. Сверхновая, взорвавшаяся в 1006 г., почти определенно относится к типу Ia, т.е. представляет собой термоядерный взрыв на поверхности белого карлика. Все сверхновые этого типа имеют почти одинаковую светимость. Зная расстояние и ти-

пичную светимость сверхновой типа Ia, мы можем ретроспективно вычислить, насколько яркой казалась звезда наблюдателям XI в. В шкале звездных величин ее блеск был порядка  $-7.5$ , т.е. где-то посередине между Венерой в максимуме и полной Луной. И весь этот свет сконцентрировался в одной звезде, которая, вероятно, невероятно сильно мерцала. Нет сомнений, полагает Винклер, что это было ослепительное зрелище; при таком свете, наверное, можно было читать ночью. Самую точную запись о яркости звезды 1006 г. оставил египетский врач и астролог Али бин Ридван, который фактически сравнил ее с Венерой и Луной.

Astrophysical Journal. 2003. V.585. №1. P.324 (США).

## Астрономия

### У Млечного Пути обнаружилось кольцо

На конференции Американского астрономического общества (Сиэтл, январь 2003 г.) группа ученых, работающих на 3.5-метровом телескопе обсерватории Апач-Пойнт в Санспоте (штат Нью-Мексико), доложила об открытии звездного кольца, окружающего нашу Галактику (Млечный Путь). До сих пор оно оставалось незамеченным, вероятно, из-за того, что лежит в той же плоскости, что и диск самого Млечного Пути, содержащий, помимо многих прочих звезд, наше Солнце и большую часть космической пыли и газовых облаков.

Новооткрытое кольцо, находящееся за пределами диска, имеет диаметр около 120 тыс. св. лет. Этот «тор» расположен примерно вдвое дальше от центра Галактики, чем Солнце. Он образован сотнями миллионов звезд и, по мнению ряда специалистов, возник миллиарды лет назад вследствие распада другой, значительно меньшей галактики, многочисленные звезды которой подчинились могучему воздействию гравитационных сил Млечного Пути. Довольно равномерное распределение звезд в но-

вооткрытом образовании говорит о том, что малая галактика — спутник нашей — слилась с ней около 10 млрд лет назад, так что за это время звезды успели в значительной мере рассеяться по всему кольцу.

Независимо проведенные наблюдения западноевропейских и австралийских астрономов на 2,5-метровом телескопе «Ньютон» в Ла-Пальме (Канарские о-ва, Испания) привели к открытию двух других участков кольца, что подтвердило его существование и очевидную замкнутость.

С гипотезой о внегалактическом происхождении кольца безоговорочно согласны не все астрономы. А.Фергюсон (A.Ferguson; Гронингенский университет, Нидерланды) не исключает, что оно может оказаться очень далеким спиральным рукавом Млечного Пути. Впрочем, против этого предположения говорит тот факт, что кольцо, в отличие от обычных спиральных рукавов, населено старыми звездами.

Science. 2003. V.299. №5604. P.183 (США).

## Планетология

### Полярные шапки Марса — из водяного льда

Когда в середине 1960-х годов было установлено, что атмосфера Марса состоит преимущественно из диоксида углерода, ученые решили, что и лед полярных шапок образован  $\text{CO}_2$ . Позже выяснилось, что в северной полярной шапке под слоем замерзшего диоксида углерода скрывается водяной лед, но эксперты продолжали считать, что уж южная-то шапка целиком состоит из «сухого льда». Причем замерзшему  $\text{CO}_2$  отводилась важная роль в формировании марсианского климата: считалось, что атмосферное давление на Красной планете регулируется испарением и конденсацией этого газа.

Однако параметры, измеренные космическими аппаратами «Mars Global Surveyor» и «Mars Odyssey», доказывают, что эта модель неверна. На снимках южной полярной шапки видны плоско-

донные круглые ямы глубиной по 8 м и диаметром от 200 до 1000 м, причем их поперечники ежегодно увеличиваются на 1—3 м. Если бы эти ямы протаивали в «сухом льде», можно было ожидать, что на дне температура недостаточно высока для его сублимации. Однако инфракрасные измерения показали, что для замерзшего  $\text{CO}_2$  ямы слишком «горячи». Построив несколько моделей летнего таяния южной полярной шапки, Ш.Бирн и Э.Ингерсолл (Sh.Byrne, A.Ingersoll; Калифорнийский технологический институт) обнаружили, что удовлетворительно объяснить данные наблюдений может лишь одна модель: слой замерзшего диоксида углерода толщиной в несколько метров на мощной подложке водяного льда. Иными словами, строение южной полярной шапки такое же, как и северной, только прикрывающая ее оболочка из «сухого льда» более толстая и потому летом полностью не исчезает. Водяной лед обнажается лишь в многочисленных округлых проталинах.

Один из выводов работы Бирна и Ингерсолла заключается в том, что масса  $\text{CO}_2$ , запасенного в южной полярной шапке, далеко не так велика, как считалось ранее. Это означает, во-первых, что Марс по содержанию углерода выпадает из общего ряда планет земной группы (на Земле и Венере его гораздо больше: на Венере он входит в состав атмосферы, на Земле связан в многочисленных карбонатных соединениях и каменноугольных отложениях). Во-вторых, диоксиду углерода отводится большая роль в моделях эволюции марсианского климата: именно обусловленный им парниковый эффект считают одной из причин того, что в прошлом на Марсе было значительно теплее. Позже, из-за изменений орбиты, Марс остыл, а диоксид углерода из атмосферы перешел в полярные шапки. Однако теперь выясняется, что ни в газообразном, ни в химически связанном, ни в замерзшем состоянии изобилия диоксида углерода на Красной планете не наблюдается.

Помимо упомянутых несоответствий, существенно меньшее количество  $\text{CO}_2$  ставит под вопрос и гипотетические планы преобразования климата Марса. В значительной степени они основывались на испарении южной полярной шапки и возвращении сохраненного там газа в атмосферу. В любом случае Ингерсолл и Бирн считают, что теперь исследователям Марса придется сосредоточить силы на поисках недостающего углерода или на объяснении его отсутствия.

Science. 2003. V.299. P.1051 (США).

## Физика

### Полцарства за владение ITER'ом

Предварительные этапы разработки и испытаний отдельных элементов для будущего термоядерного реактора ITER потребовали 17 лет интенсивной работы большого коллектива ученых из многих государств (Канады, России, США, Японии, недавно присоединившегося Китая<sup>1</sup>, а также стран Европейского Союза).

Сердце установки — окруженный несколькими типами сверхпроводящих катушек (общей массой 900 т) гигантский вакуумный сосуд, способный удерживать водородную плазму, нагретую до температуры запуска реакций ядерного синтеза. Кроме основного реактора в комплекс войдут десятки обслуживающих его сооружений общей площадью до 40 га. Успешность предварительных разработок позволила приблизить начало строительства, и теперь одна из основных проблем — место расположения ITER.

На совещании в Санкт-Петербурге 18 февраля 2003 г. свою территорию предложили Канада (вблизи Торонто), Япония (на северном побережье о.Хонсю) и ЕС (на юге Франции или в Испании, неподалеку от Барселоны). Руководство проекта заявляет, что главным аргументом в выборе станут финансовые предложения

<sup>1</sup> Проект ITER: круг участников расширяется // Природа. 2003. №10. С.71.

претендентов. Победитель конкурса должен будет оплатить от 20 до 25% общей стоимости самого реактора.

Болезненность решения в пользу только одного конкурсанта, возможно, смягчат варианты изготовления отдельных компонентов установки у разных партнеров, которые предложат наиболее выгодные условия. Перечень из 85 позиций включает сверхпроводящие катушки, системы нагрева плазмы, вакуумные насосы, криогенное оборудование и диагностические приборы. Все участники хотят поставлять высокотехнологичные изделия, производить же обычные (например, силовые трансформаторы) желающих нет. Наиболее привлекательный заказ — сверхпроводящие материалы для 19 катушек тороидального поля — скорее всего разделят между многими участниками, а вот аппаратуру для диагностики изготовит единый поставщик.

Общая политика руководства ITER — обеспечить выгодность проекта для каждого из партнеров. Окончательное соглашение о месте строительства страны-участницы должны ратифицировать в начале 2004 г.

[http://perst.issph.kiae.ru/inform/perst/3\\_07/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/inform/perst/3_07/index.htm)

## Электроника

### Увидим ли схемы в алмазах?

Природный углерод образует две формы кристаллических материалов: в высокоэнергетической (алмазе) атомы соединены одним типом связи, а в низкоэнергетической (графите) — двумя разными. В отличие от кремния, который расположен в IV группе Периодической системы непосредственно под углеродом, графит в электронике не используют<sup>1</sup>. (Интересно, что низкоэнергетические формы кремния и германия имеют ту же кристаллическую структуру, что и алмаз;

<sup>1</sup> Об электронных характеристиках пленок из графита см.: Когда графит предпочтительней алмаза // Природа. 2003. №1. С.81.

графитоподобных структур эти элементы не образуют.)

Физические свойства алмаза (напряжение пробоя, теплопроводность, ширина запрещенной зоны) делают его весьма привлекательным в практическом плане. Главное препятствие для его использования в электронике — трудность синтеза кристалла с достаточно совершенной структурой (природные минералы слишком загрязнены примесями и дефектами).

Впервые искусственный алмаз был получен в 1955 г. обработкой графита при высоких давлениях и температуре в присутствии катализатора. Сейчас это стандартный промышленный метод производства кристаллов размерами от субмикронных до субмиллиметровых, но из-за примесей и дефектов их в электронике не используют. Алмазы получают также осаждением из паровой фазы в гидроуглеродной плазме, однако они имеют поликристаллическую структуру — зерна диаметром 1–10 мкм с разной ориентацией. Некоторые успехи в выращивании алмазных зерен с единой ориентацией достигнуты на подложке  $\beta$ -SiC. Полученные пленки показали многообещающие результаты, но трудности с синтезом  $\beta$ -SiC преодолеть не удалось.

За последние два года появились основания для осторожного оптимизма. В качестве подложек прекрасно показали себя алмазы, полученные первым способом и отполированные. На этих подложках, теперь уже вторым методом, были выращены ультратонкие алмазные пленки — монокристаллические слои, пригодные для использования в электронике. Особенно важно, что их проводимостью можно управлять, вводя бор в процессе выращивания. Таким образом, выполнены ключевые требования, предъявляемые к полупроводниковому материалу. Качества синтезированного алмаза превзошли теоретические ожидания.

[http://perst.issph.kiae.ru/inform/perst/3\\_05/index.htm](http://perst.issph.kiae.ru/inform/perst/3_05/index.htm)

## Энергетика

### Энергетические перспективы Великобритании

В марте 2003 г. британское правительство опубликовало официальную Белую книгу — план развития энергетики, нацеленный на резкое сокращение выброса в атмосферу CO<sub>2</sub>. Особенно важно — намерение достигнуть этого, не прибегая к строительству новых атомных электростанций. Главная ставка делается на использование естественных источников энергии — ветра, морских волн и приливов. Предполагается за ближайшие 50 лет сократить поступление CO<sub>2</sub> в воздушное пространство на 60%, что даже превышает пределы, установленные для этой страны Киотским протоколом.

Сейчас возобновляемые источники поставляют лишь 3% потребляемой в Великобритании энергии. Правительство предлагает к 2010 г. довести эту величину до 10%, а к 2020 — до 20%. Если это удастся, то ветер, приливы и волны полностью заместят мощности всех 33 атомных электростанций, вырабатывающих сегодня около 26% потребляемой в стране энергии. Это весьма существенно, так как срок действия АЭС истечет через 30 лет. Предполагается также повысить эффективность используемых ныне мощностей и поощрять научные и конструкторские разработки новых систем производства энергии; на это выделяется сумма, эквивалентная 95 млн долл. США, что увеличит общие ассигнования на подобные цели до 550 млн долл. за четыре года. Промышленным предприятиям, работающим на использовании возобновляющихся источников энергии, предоставляются налоговые льготы, которые к 2010 г. достигнут приблизительно 1.6 млрд долл. Упрощается процедура одобрения проектов по сооружению ветроэнергетических установок как на берегу, так и в море.

Эти меры, естественно, претерпевают сопротивление со стороны охранных групп.

ны природной среды, однако энергетики и инженеры встречают их с некоторым скептицизмом. Официальная реакция Лондонского Королевского общества и Физического института содержит предостережение по поводу полного отказа от атомной энергетики ввиду того, что ветер отличается крайним непостоянством, в некоторой степени это относится и к морским волнам. Поэтому эксперты предлагают создать смешанную энергосистему, которая будет использовать наряду с возобновляемыми источниками также энергию атома и традиционно ископаемого топлива.

Некоторые специалисты считают устанавливаемые Белой книгой мерки завышенными и в указанные сроки недостижимыми, но в принципе — желательными.

Science. 2003. V.299. №5611. P.1291 (США).

## Ботаника

### Зачем деревья сбрасывают листья на зиму?

Не так просто объяснить, почему у многих деревьев умеренных широт возникла способность сбрасывать на зиму листья. Ссылки на сильные морозы и снег, скапливающийся на ветках, недостаточно убедительны, поскольку некоторые листопадные голосеменные процветали в Северном полушарии в мезозое, когда климат был очень теплым и даже в приполярных широтах зимой сохранялись положительные температуры. Одна из распространенных гипотез связывает листопад не столько с зимними холодами, сколько с продолжительной темнотой, когда фотосинтез невозможен, но дыхание продолжается и растение теряет с выделяемым CO<sub>2</sub> значительную часть накопленного углерода.

Д.Ройер с коллегами из Университета Шеффилд (Великобритания) попытались проверить данную гипотезу прямыми экспериментами<sup>1</sup>. Подопытными были

<sup>1</sup> Royer LL., Osborne C.P., Beerling D.J. // Nature. 2003. V.424. P.60—62.

выбраны несколько видов, чьи ближайшие родственники или они сами жили в конце мезозоя: три вида листопадных — хвойные метасеквойя (*Metasequoia glyptostroboides*) и кипарис болотный (*Taxodium distichum*), широколистное голосеменное растение гинкго (*Ginkgo biloba*), а из вечнозеленых — секвойя (*Sequoia sempervirens*) и нотофагус (*Nothofagus cunninghamii*), покрытосеменное из Южного полушария, близкий родственник бука. Эти «живые ископаемые» обитали даже в полярных районах Северного полушария вплоть до 85°с.ш., т.е. там, где была настоящая полярная ночь. Исходно годовалые саженцы три года выращивали в специальных камерах, создавая сезонные изменения длины светового дня и температуры, соответствующие ситуациям на 69°с.ш. (примерно широта Мурманска или низовьев Колымы) в конце мела — начале палеогена, когда климат был гораздо теплее. Температуру в камерах на протяжении года плавно меняли от 5—10°С (самое холодное время) до 20—25°С (наиболее теплое). Шесть летних недель длился день, а зимних — ночь. В промежутках продолжительность светового дня плавно увеличивали от зимы к лету и также плавно уменьшали от лета к зиме. В одном из вариантов опыта содержание углекислоты поддерживали на уровне 400 ppm (в современной атмосфере ее концентрация равна 360 ppm), а в другом — 800 ppm (примерно как в конце мезозоя). Определяли годовой прирост биомассы (т.е. чистую первичную продукцию) и многократно в течение года измеряли суточное потребление растениями CO<sub>2</sub>.

Оказалось, что в темный период года дыхание вечнозеленых деревьев действительно выше, чем листопадных. А значит, больше расходуется запасенного углерода, что свидетельствует в пользу проверяемой гипотезы. Выяснилось также, что у листопадных видов потери углерода со сброшенной листвой значительно превышают его экономию за счет ослабленного дыхания в безлистом состоя-

нии. Кроме того, авторы сравнили между собой обе группы деревьев по таким количественным показателям, как убыль углерода и прирост биомассы за год. Особенно показательным было сравнение двух довольно близких видов — вечнозеленой секвойи и листопадной (точнее, веткопадной) метасеквойи. Хотя годовая первичная продукция у них примерно одинакова, *M.glyptostroboides* теряет суммарно с опадом и дыханием в 16 раз больше углерода при содержании CO<sub>2</sub> в воздухе 400 ppm и в 14 раз больше при 800 ppm, чем выращиваемая в тех же условиях *S.sempervirens*. Но если у секвойи 90% потерь приходится на дыхание, то у метасеквойи 98% — на опад. Таким образом, гипотеза экономии углерода как основной причины возникновения листопадности экспериментально не подтверждается, и проблема по-прежнему остается нерешенной. Стоит также отметить, что при повышенной концентрации CO<sub>2</sub> первичная продукция у всех видов была выше — примерно на 25—30%.

© А.М.Гиляров,

доктор биологических наук  
Москва

## Психология

### Телевидение и агрессивность

Психологи, криминалисты, биологи, медики, специалисты по социальным наукам и просто многие граждане, в особенности родители, обеспокоены проблемой, названной в заголовке. Еще в 70-х годах научные сотрудники Университета штата Мичиган в Анн-Арборе (США), возглавляемые Л.Роуэлл-Хьюсманном (L.Rowell-Huesmann), взяли под наблюдение 557 чикагских ребятишек и за три года исследований выяснили, что между их отношением к телевидению и готовностью к детским формам агрессии существует определенная связь. 15 лет спустя они обследовали 329 юношей и девушек из той же группы: те из них, кто еще в восьмилетнем возрасте часто смотрел телевизион-

ные эпизоды с драками, стрельбой и тому подобными сценами насилия, достигнув 20-летнего возраста, оказались более агрессивны, чем другие.

Лица мужского пола, еще детьми числившиеся в верхней 20%-й части списка индивидов — любителей грубых телевизионных эпизодов и склонных к применению силы, вдвое чаще били своих жен. Женщины же, постоянно наблюдавшие подобные сцены на экране, отличались от других тем, что чаще бросали тот или иной предмет в своего мужа. Сходные различия наблюдаются и при измерении коэффициента умственного развития (IQ), определении социального статуса и родительского отношения к детям у выросших «подопытных». Участники исследований считают доказанной такую связь в не меньшей степени, чем связь рака легких с курением.

Биолог П.Клопфер (P.Klopfers; Дьюкский университет в Дареме, США) пришел к выводу, что телевидение не только усиливает заложенную от природы склонность к агрессии, но может служить и самостоятельной ее причиной. С другой стороны, австралийский специалист по биостатистике Р.Хоки (R.Hoskey; Брисбенская больница им.Матера), соглашаясь, что связь между телевидением и агрессивным поведением несомненно существует, в то же время полагает, что агрессивные люди, возможно, просто любят смотреть сцены насилия. Корреляция между такой склонностью в детском возрасте и взрослой агрессивностью составляет 0,2, т.е. вклад телевидения в увеличение склонности к насилию оценивается не более чем в 5%. Дискуссия продолжается.

Science. 2003. V.299. №5614. P.1839 (США).

### Охрана природы. Генетика

#### Судьба бизонов зависит от ДНК

В начале 2002 г. на территорию национального парка «Гранд-Каньон» в штате Аризона (Юго-Запад США) вторглось стадо бизонов, насчитывающее около 100 го-

лов. Их миграция была вызвана, очевидно, длительной засухой в прилегающей долине Хаус-Рок, где они паслись. С тех пор количество животных удвоилось и перевыпас стал превращать природные луга в пыльные полупустыни (помимо этого бизоны затаптывали археологические памятники — свидетельства жизни древних индейских племен).

Первая реакция властей — выдворить бизонов за пределы парка и не допустить их возвращения. Однако возведение ограды было признано нерациональным: они легко могут проломить чуть не любой забор, но главное — всякая ограда препятствовала бы миграции представителей местной фауны, например чернохвостого длинноухого оленя (*Odocoileus hemionus*), обитавшего здесь издревле и непрерывно.

Возникла проблема: имеет ли бизон права аборигена и можно ли считать именно это стадо «чистокровным»? Дело в том, что в 1900-х годах бизонье поголовье стало объектом непродуманных экспериментов авантюриста Ч.Дж.Джонса по кличке Буффало Билл. Он был одержим идеей вырастить гибридов этого животного с коровами. Но при рождении бычков чаще всего самка гибла. Телки же, вырастая, могли скрещиваться с чистопородными бизонами, но их отпрыск обычно оказывался стерильным. Не дождавшись дохода, спонсоры Джонса отказались субсидировать дальнейшие опыты, и за бесценное стадо было продано штату Аризона. Установить, являются ли эти «вторженцы» потомками чистопородных бизонов, использованных при скрещивании, или же стихийными гибридами, можно лишь путем анализа их ДНК.

Официальные биологи штата считают несущественным вопрос, всегда ли жили здесь бизоны (тем более что за выдачу лицензий на их отстрел местное управление охотоводства и рыболовства выручает около 40 тыс. долл. в год). Другое дело — биологи, работающие в самом парке, — для них важна история. Никто не оспаривает факт, что бизоны были распрот-

ранены здесь уже в плейстоцене, т.е. 10 тыс. лет назад, но как долго они обитали в данной местности, неизвестно. Приглашенный для консультации палеонтолог Дж.Мид (J.Mead; Северо-Аризонский университет во Флагстаффе) уверен, что бизон пасся в районе Фор-Корнерс (штат Вайоминг к северу от Аризоны) уже вскоре после окончания ледникового периода, хотя тамошние стада были меньшими, чем встречавшиеся на Великих равнинах. Однако о пребывании их в долине Хаус-Рок, откуда пришла обсуждаемая популяция, до сих пор свидетельств не обнаруживалось.

Сегодня специалисты по молекулярной генетике Дж.Дерр (J.Derr; Техасский университет сельского хозяйства и механизации) и его коллеги, проведя анализ тканей множества бизонов в самых разных уголках США, обнаружили «коровью» митохондриальную ДНК (мтДНК) примерно у 40% поголовья этих животных. Но если гибридные быки скрещивались снова с самками бизона, их потомство должно было обладать чисто бизоньими мтДНК, но сохранять в ядерной ДНК гены домашнего скота. Чтобы прояснить, так ли это, Дерр с коллегами идентифицировал 54 микрофрагмента ДНК, взятой у бизонов из разных районов, отстоящих друг от друга на сотни и тысячи километров.

Теперь полученные результаты будут сопоставлены с данными по «Гранд-Каньону». Если здешнее стадо окажется чистокровным, оно сможет послужить важным для генетики объектом изучения. Тогда и коллектив этого парка должен будет принять его под свою охрану.

Science. 2003. V.299. №5614. P.1835 (США).

### Геология

#### Как «изнашиваются» Гималаи

Гималаи — один из наиболее подверженных эрозии регионов. Однако точных данных о скорости этих процессов пока не существует. Обычно оценки делаются

на основе усредненных величин в масштабах нескольких миллионов лет. Существенно уточнить современную скорость эрозии предлагает американский геолог-геохимик Вэнс (Vance) с коллегами; их методика учитывает и космогенный фактор, играющий в этом немалую роль.

Постоянное воздействие космических лучей ведет к появлению в верхних слоях земной коры нестабильных изотопов. По их концентрации и можно судить о ходе эрозии.

Экспедиционные работы в нескольких районах Гималаев (в том числе труднодоступных) позволили обнаружить участки, где эрозия достигает в отдельных случаях 2.7 мм в год (как правило, на высокогорных плато). Сопоставление с данными других измерений показало, что процессы эрозии и вымывания почвы в последние сотни тысяч шли более или менее равномерно. Но ныне их интенсивность возросла.

Эта информация важна для понимания взаимодействия климатических факторов (включая влажность и гидрологические показатели) с явлениями, изучаемыми геотектоникой, особенно в гималайском регионе, где идут процессы горообразования. Необходимо также учитывать, что эрозия силикатных (содержащих  $\text{SiO}_2$ ) пород приводит к связыванию атмосферного углерода ( $\text{CO}_2$ ), существенно влияя на химический состав воздушной оболочки Земли.

Earth and Planetary Science Letters. 2003. V.206. P.273; Science. 2003. V.299. №5610. P.1151 (США).

### Организация науки. Океанология

## VII Международный конгресс по истории океанографии

VII Международный конгресс по истории океанографии (International Congress on the History of Oceanography — ICNO-VII; Калининград, сентябрь 2003 г.) проходил на базе Музея Мирового океана. Сравнительно молодой, но уже

снискавший заслуженную известность среди морских музеев мира (директор С.Г.Сивкова), он собрал на конгресс свыше 200 ученых и специалистов из 110 организаций, представлявших Россию, Бельгию, Болгарию, Великобританию, Германию, Данию, Египет, Индию, Индонезию, Испанию, Канаду, Литву, Нигерию, Нидерланды, Норвегию, Польшу, Румынию, США, Украину, Францию, Хорватию, Швецию, Эстонию.

Основная тема конгресса — международное сотрудничество в исследовании Мирового океана. Секционные заседания были посвящены истории океанографии, изучению полярных областей океана, специализированным исследованиям и национальным вкладам в его освоение. Здесь Россия по праву может гордиться своими успехами. Достаточно вспомнить, что Второй Камчатской экспедицией в 1733—1743 гг. были изучены северные берега Сибири, северо-западные окраины Северной Америки, Алеутские и Командорские острова, Курилы; выдающиеся исследования были проведены русской кругосветной экспедицией И.Ф.Крузенштерна в 1803—1806 гг.; русские флотоводцы Ф.Ф.Беллингаузен и М.П.Лазарев в 1819—1821 гг. открыли Антарктиду. Особенно большой вклад внесли отечественные мореплаватели и океанографы в изучение морей Северного Ледовитого океана: в 1913 г. открыта Северная Земля, исследованы другие географические объекты, Великим Северным морским путем были связаны Атлантический и Тихий океаны. В 20—40-х годах прошлого века научно-исследовательское судно «Персей» осуществило 84 экспедиции в Баренцево, Белое, Карское, Норвежское и Гренландское моря. Научно-исследовательское судно «Витязь» в 50—70-х годах XX в. провело 65 научных рейсов в разные районы Мирового океана. Теперь легендарный «Витязь» находится здесь — в Музее Мирового океана, сотрудники которого имеют большие заслуги в деле сохранения исторических судов и уникальных экспонатов.

Хорошо известно, сколь велико значение Мирового океана для человечества. Участники конгресса говорили о насущной потребности усилить международное сотрудничество и ориентировать исследования на сохранение этого наиболее ценного ресурса для будущих поколений. При этом калининградский музей мог бы стать международным информационным центром по истории океанографии путем создания архива изобразительных материалов и специализированной библиотеки по океанографии, включая неопубликованные документальные источники, а также копии или оригиналы рукописей замечательных океанографов прошлого. Эту важную работу можно было бы выполнить с участием ряда международных центров, таких как Скриппсовский институт океанографии (США) и Океанографический музей в Монако.

VII Международный конгресс по истории океанографии обратился к океанографам всех стран с призывом активно участвовать в подготовке и организации следующего, VIII Международного конгресса по истории океанографии, который следовало бы провести не позднее 2008 г. и, по примеру ICNO-VII, — вблизи Мирового океана; его можно посвятить истории исследований, открытий и освоения преимущественно Южного океана.

© Г.В.Короткевич  
Москва

### Вулканология

## Взбунтовались недра Индонезии

Нельзя сказать, чтобы знаменитые своими пряностями Молуккские о-ва, лежащие на востоке Индонезии, считались спокойным для проживания местом. Чего стоит хотя бы один вулкан Дуконо, возвышающийся более чем на 1000 м над о.Хальмахера, который он же и породил в незапамятные времена.

В 1550 г. из Дуконо вырвался очередной колоссальный язык ла-

вы; застыв, она заполнила морской проход между Хальмахерой и торчавшим из воды конусом горы Гунунг-Мамуя, сократив число проливов на Земле, зато несколько увеличив площадь Молуккских о-вов. За этими катастрофическими событиями последовал довольно длительный период относительного покоя, во время которого редкое население Хальмахеры лишь иногда привычно вздрагивало от звуков далекого подземного взрыва, никакого вреда не приносящего, да в сентябре 1995 г. над вершиной горы внезапно вздыбился шестикилометровый столб густого дыма, но и его быстро развеяли ветры. Зато в марте 2003 г. сотрудники Открытого университета в Милтон-Кейнсе (Великобритания) Д.Коппола и Д.А.Ротери (D.Coppola, D.A.Rothery), обрабатывая космические снимки, отметили на тех, что относились к августу—сентябрю 2002 г., нечто подозрительное. Тщательный анализ подтвердил: в 10 пунктах у вершины и на склонах Дуконо тепловое излучение превышало норму безопасности. Обнаружилось и существование множества частично перекрывающих друг друга кратеров, казавшихся давно потухшими. Один из них, поперечником более 700 м, даже содержит озерко раскаленной лавы, готовой излиться в любую минуту.

На северо-западе о.Хальмахера находится довольно спокойное вулканическое поле Гунунг-Ибу. Поднявшееся с его поверхности в 1999 г. облачко пепла никого не взволновало, однако космические снимки в инфракрасном диапазоне, сделанные в октябре 2001 г., показали, что на дне древнего кратера медленно растет купол из свежей лавы. В верхней части поля Гунунг-Ибу геологи нашли кратер диаметром 1 км и глубиной около 400 м; в его недрах прячется несколько небольших лавовых озерков; из одного к морю струится ручеек расплавленной породы. В памяти населения сохранилось лишь несколько извержений Гунунг-Ибу, первое из них случилось в 1911 г. Но теперешнее оживление вулкана вызывает некоторое опасение.

От печально знаменитого вулкана Мерапи, что в центре о.Ява, можно ожидать чего угодно. С июля по сентябрь 2002 г. индонезийские ученые из Вулканологического управления в Бандунге, возглавляемые Д.Ахмадом (D.Ahmad), наблюдали частые языки лавы и огненные фонтаны высотой до 550 м над вершиной. Космические снимки показывают, что в последнее время здесь участились обрушения свежих куполов, видны отдельные потоки раскаленных материалов, которые, впрочем, не достигали густо населенных подножий горы, высота которой 2910 м над ур.м. Мерапи заслуженно считается одним из самых активных вулканов Индонезии, особо опасным тем, что в его тени располагается Джокьякарата — крупнейший город страны.

Мерапи — самый южный и наиболее молодой в цепочке огнедышащих гор, тянущихся на северо-запад к дремлющему пока вулкану Унгаран. Судя по геологическим и геофизическим свидетельствам, «первый» Мерапи начал расти в эпоху плейстоцена, но около 2 тыс. лет назад, не выдержав собственной тяжести, обрушился и перекрыл обломками еще более древний вулкан Батуланг. Теперь рост «второго» Мерапи идет очень активно, так что на его верхних склонах растительность не успевает возобновляться после очередной катастрофы.

Bulletin of the Global Volcanism Network. 2003. V.28. №3. P.6, 9 (США).

## Климатология

### Динамика климата: что ждет Австралию

Центральные области Австралии заселены сравнительно слабо: более 80% 15-миллионного населения страны живет не более чем в 50 км от берега моря, главным образом на востоке и юге континента. Неравномерность распределения жителей усиливается: с 1991 по 1996 г. четверть прироста их численности пришлось на трехкилометровую прибрежную

полосу штатов Новый Южный Уэльс и Квинсленд, а также приморскую часть штата Западная Австралия. Ясно, что зависимость населения от экстремальных проявлений стихии — тропических циклонов, штормовых приливов, наводнений в речных дельтах и т.п. — возрастает.

Согласно данным Межправительственной комиссии по изменению климата при ООН и построенным ею математическим моделям для различных сценариев, к 2100 г. средняя температура Земли повысится по сравнению с 1990 г. на 1.4—5.8°C. Для сравнения: за весь только что истекший век потепление составило 0.7±0.2°C.

Повышение уровня Мирового океана за XXI в. может составить от 0.8 до 8.0 мм/год. При этом береговая линия сильно эродируется, а ее горизонтальное отступление в среднем превышает вертикальный подъем вод в 50—100 раз. Следовательно, прогнозируемый к 2100 г. подъем уровня моря может привести к смещению песчаных прибрежий Австралии на расстоянии 4.5—88 м от нынешнего положения. О последствиях такого процесса можно судить на основании прошлого. В период с 1915 по 1998 г. во Фримантле относительный уровень моря повышался на 0.86±0.12 мм/год, в Сиднее соответствующая величина между 1897 и 1998 г. составляла 1.38±0.18 мм/год, а в Порт-Артуре (штат Тасмания) с 1890 г. и поныне — примерно 1.2±0.2 мм/год.

Главным погодным фактором для Австралии в межгодовом масштабе служит явление Эль-Ниньо. В годы его развития на востоке континента обычно наступает засушливый и жаркий период, когда же на смену приходит его антипод Ла-Нинья, влажность повышается, а температура падает. С Эль-Ниньо часто связаны градобития и резкое понижение атмосферного давления на востоке страны. Кроме того, Эль-Ниньо сказывается на метеоусловиях в Южной Пацифике, где формируются тропические циклоны. С 1967 г. Австралия стала жертвой 46 циклонов,

общий ущерб от которых достиг 8.8 млрд австрал. долл. Период между 1969 и 1996 г. ознаменовался снижением числа циклонов, зато возросла их интенсивность.

Метеорологи выдвигают на ближайшие годы следующий прогноз для Австралии. Максимальная скорость ветра может возрасти на 5—10%, а количество осадков — на 20—30%. Наиболее жестокие тропические циклоны вызовут повышение уровня штормовых приливов, числа наводнений и оползней в восточной части страны.

Среднее потепление воздуха в годовом масштабе над различными областями материка может достичь к 2030 г. (по сравнению с 1990 г.) 0.4—2.0°C, причем в большей мере это коснется северо-запада страны, в несколько меньшей — побережий и Тасмании. К 2070 г. на основной части континента повышение температуры может составить от 1 до 6°C. Весной этот фактор будет особенно заметным.

Среднегодовое количество осадков в различных районах Австралии будет меняться по-разному: на юго-западе к 2030 г. оно станет колебаться по сравнению с нынешним от -20% до +5%, к 2070 г. — между -60% и +10%. Но в их общей долгосрочной тенденции к снижению специалисты уверены. Особенно отчетливо это должно проявляться в зимние и весенние сезоны. С другой стороны, сила ливневых осадков возрастет, что должно привести к повторным наводнениям. Водоснабжение городов и поселков может оказаться под серьезной угрозой в связи с потеплением, ростом испарений и иссушением ряда рек и водохранилищ, особенно — на юго-западе Австралии.

Климатические перемены делают уязвимыми многие из природных систем. В недалеком будущем значительная часть пресно-

водных равнин севера страны подвергнется вторжению соленых морских вод, к чему растительность и животный мир приспособиться не сумеют. Первой жертвой станут мангровые заросли — место размножения многих видов рыб, креветок и морских черепах, которые, правда, могли бы перенести свое место обитания, но этому в ряде случаев препятствуют волнозащитные сооружения и застройка. Спасительные меры необходимо предпринимать уже сегодня. Уроком бедствия служат события 1922 г., когда флора и фауна залива Эрвей (штат Квинсленд) сильно пострадали в результате экстремальных осадков в условиях существенного антропогенного воздействия.

Коралловые постройки сейчас сокращаются повсеместно, главным образом из-за потепления морских вод, изменения их солености, прозрачности, загрязнения, из-за механических повреждений, вероятно, добавится увеличение числа тропических циклонов и повышение уровня океана. Австралия, которой природа «доверила» Большой Барьерный риф, несет здесь особую ответственность.

Climate Change and Australia's Coastal Communities. 2002. P.1—7 (Австралия).

## Археология

### Библейская хронология подтверждается

Вот уже около 10 лет специалисты полемизируют о роли, которую в действительности играли царь Давид и его сын Соломон, и датах их правления: археолог И.Финкельштейн (I.Finkelstein; Тель-Авивский университет, Израиль) утверждает, что эти важнейшие персонажи Ветхого Завета жили не в X в. до н.э., как считалось ранее, а примерно столетием

позже и деяния их сильно преувеличены<sup>1</sup>.

Решающим аргументом в дискуссии стали результаты раскопок, проведенных недавно под руководством Х.Й.Брюнса (H.J.Bruins; Негевский университет им.Бен-Гуриона, Израиль) в северной части Израиля. Археологи вскрыли курган, который образовался на месте г.Рехова, бывшего в древности крупным центром ремесленничества и торговли. Датировка найденных здесь предметов новейшим способом радиоактивного анализа в сочетании с дендрохронологией показала, что возраст находок охватывает XII—IX вв. до н.э. В ряде случаев для органических остатков (частично обгоревших оливок и зерна) удалось установить весьма точную дату, применив масс-спектрометрию с ускорителем частиц.

Анализ почвенных слоев показал, что Рехов неоднократно разрушали, но затем город отстраивался. Наибольшее число предметов обнаружено в слое, соответствующем 935—898 гг. до н.э. Благодаря этим находкам археологи пришли наконец к согласию с египтологами о дате завоевания Палестины фараоном Шошенком I (ранее не было единого мнения, какой именно из культурных слоев соотносится с этим событием — опорной точкой древнеегипетской и библейской хронологий). Общее мнение таково: фараон привел войско в Палестину около 925—918 гг. до н.э., когда отсталое прежде государство благодаря усилиям царя Соломона (он умер всего за несколько лет до вторжения Шошенка I) стало важным политическим и культурным центром региона. Эти факты полностью опровергают гипотезу Финкельштейна. Science. 2003. №5617. P.229, 315 (США).

<sup>1</sup> См.: Дискуссия вокруг ветхозаветной хронологии // Природа. 2000. №12. С.20—21.



# Географ и геоботаник В.Б.Сочава

Л.С.Абрамов,  
доктор географических наук  
Институт географии РАН  
Москва

Выдающимся событием в 50–70-е годы XX в. было создание Сибирского отделения Академии наук СССР. Речь шла не просто о расширении географии науки, о рассредоточении ее по территории страны, создании новых центров наряду с Москвой и Ленинградом и столицами союзных республик. Замысел был шире и глубже — построить новую системную, мощную организацию, охватывающую необъятные просторы Сибири, и развивающую систему институтов. Было задумано обеспечить условия для дальнейшего развития региональных исследований, но в первую очередь — фундаментальных. Речь шла о подготовке новых сил, а не о дублировании уже существовавших научных учреждений. Для этого нужны были материальные вложения, издательская база.

Издательство Сибирского отделения Академии наук помимо научной литературы публиковало книги, рассказывающие о новых институтах, а также юбилеях, внесших вклад в развитие сибирской науки, и, конечно, о главном организаторе Отделения — академике М.А.Лаврентьеве. Теперь же речь идет о целой серии «Наука Сибири в лицах», которую открывает книга о выдающемся географе и геоботанике, создателе Института географии Сибири и Дальнего Востока, ныне Института географии СО РАН, Викторе Борисовиче Сочаве (1905–1978).

География долго не пользовалась уважением в академии. Со вре-

мени закрытия созданного еще Петром I Географического департамента в 1802 г. в Академии наук России в течение 114 лет никакого географического учреждения не было вообще, а Институт (физической) географии был создан лишь в 1935 г. В академии у географии были прямые и при том весьма авторитетные недоброжелатели. С трудом пробивалась она и на естественные факультеты в университетах. В этих условиях изучением огромной страны занимались геологи, потом и почвоведы, но особенно много сделали именно геоботаники. И в числе учителей или старших товарищей Сочавы были академик В.Н.Сукачев, президент Академии наук В.Л.Комаров, исследователь северной природы Б.И.Городков. Это определяло широту знаний и последовательность интересов героя книги.

Сочава, коренной петербуржец, выпускник Лесной академии, стал полевым исследователем растительности северных районов страны, в том числе Урала. Обстоятельства требовали от него знаний о геологическом строении и почвах, а также о гидрологических и климатических условиях исследованных районов и, конечно, закрепления результатов на картах. Так формировался разносторонний исследователь, ставший в 1926 г. сотрудником Ботанического музея, который спустя пять лет был преобразован в Ботанический институт Академии наук. Знания были такими разносторонними и глубокими, что Сочава стал преподавать физическую геогра-



Виктор Борисович Сочава: Жизненный путь. Научное творчество. // Сост. В.В.Воробьев, В.А.Снытко, Е.Г.Нечаева.

Новосибирск: Ин-т географии СО РАН, 2001. 194 с. (Из сер. «Наука Сибири в лицах».)

фию, а потом и заведовать кафедрой в Ленинградском педагогическом институте им.А.И.Герцена.

Молодой ученый оказался великолепным лектором, послушать которого приходили студенты с других факультетов. Всегда элегантно одетый, с неизменным галстуком-бабочкой, он был кумиром студентов. Защитив кандидатскую, а затем и докторскую диссертацию, Сочава в 1950 г. стал профессором географии ЛГУ.

В 1953 г. Виктор Борисович был избран членом-корреспондентом. В БИНе он, наряду с Е.М.Лавренко, занимался не только изучением северных, а потом и сибирских регионов, но и методикой картирования крупномасштабным картографированием растительности. Все это объясняет, как беспочвенны были разговоры о том, что геоботаник согласился поехать в Сибирь просто из-за перспективы быть избранным в академики. Он был готов к поездке и как знаток природы Сибири и Дальнего Востока, имея большой опыт организационной работы, а как показала жизнь — и новые, передовые идеи в области географии. И ни он, ни ученые созданного им института никогда не пожалели об этом. Более того, Сочава пользовался большим авторитетом и искренней любовью сослуживцев и подчиненных.

Теперь о самой книге. Как и большинство публикаций такого жанра, это сборник статей, написанных коллегами и сослуживцами. Характерно, что двое из его составителей — академик В.В.Воробьев и член-корреспондент В.А.Снытко — стали впоследствии директорами Института (третья на титульном листе — геоботаник и геохимик Е.Г.Нечаева).

Книга состоит из четырех неравных частей и обширной библиографии. Первая часть — краткая характеристика жизненного пути Виктора Борисовича, написанная Воробьевым. Остальные посвящены научному труду Сочавы — вторая, тоже короткая (47 с.) в Ленинград-

ский период, а третья, основная, — его деятельности в Сибирском отделении.

В ленинградском периоде рассказывается о начале работы у маститых учителей (В.Л.Комарова, В.Н.Сукачева, Б.Н.Городкова) и общении с ними; об экспедициях на Крайний Север и Дальний Восток. Далее следуют очерки, в которых раскрывается вклад Виктора Борисовича в создание карт растительности и природное районирование СССР. Наконец, кратко, но емко охарактеризованы работы Сочавы по методике геоботанического картографирования СССР.

Естественно, что большая часть книги (92 с.) — это рассказ о сибирском отрезке жизни и деятельности ученого. В очерках раскрывается новаторство во всех областях: сочетание теоретических поисков с развертыванием целой системы стационаров, характеризующих разные типы природы, налаживание связей с различными организациями, проведение ранее практиковавшихся в академии конференций с деятелями регионов для внедрения научных результатов. Постановка специальных исследований, раскрывающих ресурсный потенциал, решение экологических проблем. Но особенно важно отметить учение о геосистемах — новый вклад в теорию, не только обновляющую современную географию, но и сближавшую ее понятия и терминологию с языком других, все более формализующихся, наук. Обо всем этом рассказывают ученики и последователи Виктора Борисовича. Все они были его единомышленниками. Создание такого сплоченного коллектива и было, пожалуй, главным достижением руководителя института, обеспечившего ему высокий авторитет. Действительно, к нему стремились молодые исследователи отовсюду — выпускники ленинградских и московских вузов, из Прибалтики и Сибири. Именно здесь они вырастали в крупных ученых, впоследствии пользовавшихся авторитетом в стране и за рубежом. Наконец, ста-

тус географии в Сибирском отделении Академии наук был особенно высок. Это подтверждала печатная продукция института: более 50 выпусков его «Докладов», а потом и одного из лучших географических журналов в стране — «Природа и природные ресурсы», ряд региональных монографий, атласов и карт. За всем этим стоял первый директор и организатор, действительный лидер института Виктор Борисович Сочава.

В четвертой части книги на примерах раскрываются некоторые черты личности ученого. Здесь очерки крупных профессоров и выпускников Ленинградского университета, товарищей по экспедициям и работников таежных стационаров, бывших студентов и аспирантов. И все это, естественно, подается в превосходных степенях. Приведу лишь один факт: после лекции студенты заспорили о том, кто их профессор по основной специальности. Преобладало мнение, что тектонист — так исчерпывающе им было охарактеризовано геологическое строение региона. Как же были удивлены слушатели, узнав, что он геоботаник. Таким во всем был Виктор Борисович.

В 1978 г. Сочава покинул Сибирь и поселился в дачном поселке ученых «Комарово» под Ленинградом, где и скончался 19 декабря того же года.

Завершает книгу обширная библиография работ, в которой так или иначе отражены вопросы географии Сибири, в том числе работы Сочавы, написанные им лично и в соавторстве с соратниками и учениками (около 500) на русском и на иностранных языках. Лично Сочаве в этом списке принадлежит 175 публикаций, в том числе 16 монографий.

В заключение должен сказать, что книга хорошо издана: плотная бумага, четкий шрифт, благородный переплет. Это подарок не только друзьям и соратникам ученого, но и историкам науки, всем любителям естествознания. Спасибо. ■

# Закрытое дело Кука

М.Ю.Зубрева  
журнал «Природа»  
Москва

Эта книга нашего постоянного автора В.С.Корякина, гляциолога и историка полярных исследований, «выросла» из статьи, опубликованной более четверти века назад в «Природе» [1]. В ней обсуждался вопрос о том, был ли Ф.А.Кук на Северном полюсе.

В то время мало кто в нашей стране, а впрочем, и за рубежом, помнил, что кроме знаменитого американского полярника Р.Э.Пири — официального покорителя и первооткрывателя крайней точки планеты (1909) — был еще один претендент на эти звания. По словам Кука, он отправился туда годом раньше и достиг полюса первым, в апреле 1908 г. Однако весть об этом событии дошла до США в сентябре 1909 г., почти одновременно с сообщением Пири о его триумфе. Дальнейшая судьба Кука трагична. Обвиненный Пири в фальсификации полюсного похода, он как мог оправдывался, но его арктической карьере пришел конец. В 1923 г. якобы за спекуляцию «сухими» нефтяными участками (впоследствии они дали нефть) он был осужден на 14 лет тюрьмы, из которых отбыл семь. Умер Кук в 1940 г., чудовищное обвинение так и не было снято.

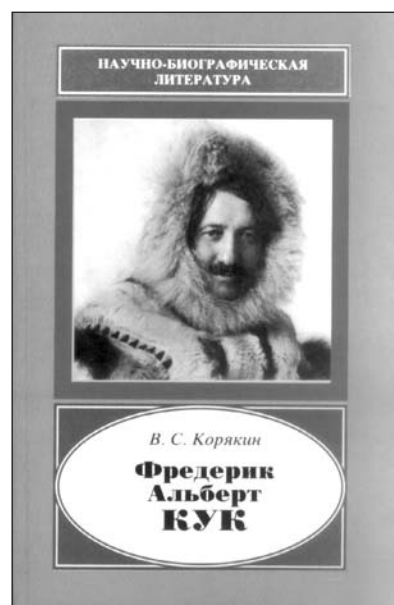
В чем же причина конфликта между двумя опытными полярниками, соратниками на протяжении немалого времени? Кук родился в 1865 г. вблизи г.Килликуна (штат Нью-Йорк), в семье немецкого эмигранта. В 1891 г. получил диплом врача в медицинском колледже Колумбийского университета в Нью-Йорке. Полярную карьеру начал в возрасте 26 лет. В начале 1890-х годов участвовал в экспедиции Пири в Гренландии (зимовка и пересече-

ние ледникового щита), затем — несколько плаваний близ самого большого острова мира на «Зете» и «Миранде» (1893, 1894), участие в бельгийской антарктической экспедиции на «Бельгике», потом — плавание для оказания медицинской помощи Пири (1901). Попытка (1903) и восхождение на высочайшую гору Северной Америки Мак-Кинли (1906) и, наконец, полюсная экспедиция 1907—1908 гг.

Пири родился в 1856 г. в Крессон-Спрингсе (штат Пенсильвания). Окончил колледж Бодуэн в Брунсвике. Работал инженером в Береговой и Геодезической службе США, затем служил во флоте. Полярными исследованиями начал заниматься с 30 лет. Первый маршрут по Гренландии в 1886 г., через четыре года — уже упомянутый поход и зимовка вместе с Куком (1891—1892), двумя годами позже — еще одна зимовка, с 1898 г. начинает приближаться к полюсу «разведочными» походами (1898—1902, 1905—1906) и, наконец, его покорение (1908—1909)...

Сначала отношение Пири к Куку вполне уважительное. После экспедиции 1891—1892 гг. он пишет: «Я многим обязан его профессиональному искусству, терпеливости и хладнокровию... Он был всегда полезным и неутомимым работником». Другой авторитетный отзыв — Р.Амундсена: «Он был единственным из нас, никогда не терявшим мужества, всегда бодрым, полным надежд и всегда имевшим доброе слово для каждого... Никогда не угасала в нем вера, а изобретательность и предприимчивость не знали границ».

После совместной экспедиции Кук просил у Пири разрешения на публикацию собственных этнографических наблюдений в Гренлан-



**В.С.Корякин.** Фредерик Альберт Кук.

М.: Наука, 2002. (Серия «Научно-биографическая литература».)

дии, но, встретив отказ, прекратил дальнейшее сотрудничество. Эта размолвка не помешала Арктическому клубу поручить Куку обследовать в полевых условиях здоровье Пири. Последняя перед походом на полюс встреча Кука и Пири произошла в 1906 г. на званом обеде в Клубе исследователей. Глава клуба воздал по заслугам обоим: «...человек, которого мы все рады приветствовать,— командор Пири. Однако в лице доктора Кука мы имеем одного из немногих американцев, если не единственного, побывавшего в обоих крайних районах земного шара — в Арктике и в Антарктике». В ответном слове, имея в виду Северный полюс, Пири без обиняков заявил: «Окончательное и полное раскрытие полярной тайны — дело, которое поручено мне. И во имя славы и чести нашей страны я должен выполнить его». И так, Америке два героя не нужны и потому Кука надлежит «уничтожить». Это и сделали журналисты, спровоцированные Пири (чем не аборигены, по словам В.Высоцкого, севшие Кука, правда, Джеймса?).

Чего только не инкриминировала Куку массовая печать: и на мысе Столуэрты (северное побережье о.Аксель-Хейберт) он не был, и температура на о.Элмер, отмеченная в дневниках, не та (там, правда, до него никто не бывал). Газетчики удивлялись, почему Кук возвращался с полюса 13 месяцев (Пири — пять), специалисты — что он должен был наблюдать солнце не 7, а 1 апреля, один из участников экспедиции Пири заявил, что Кук страдает галлюцинациями. Дальше — больше: оказывается, он никогда не бывал не только на полюсе, но и на Мак-Кинли. Добила Кука в 1910 г. публикация в журнале «Хэмтон»: в результате редакторской правки и вставки куска, который он не писал, Кук как бы и сам сомневался, что достиг полюса.

Судьба Кука взволновала нашего автора В.С.Корякина, когда однажды в букинистическом магазине он наткнулся на дореволюционный пере-

вод книги под названием «Открытие таинственного полюса» [2]. На титуле значились оба полярника, но часть текста принадлежала не Пири (его повествование о полюсной эпопее было в нашей стране известно), а Куку. Обладая 15-летним опытом работы в Арктике, наш автор сразу убедился в подлинности описанных событий, в тексте не было ничего такого, что могло бы навести на мысль о подделке или фальсификации. Но откуда тогда возникло само обвинение? И Корякин решает разобраться с делом Кука.

В его собственной деятельности впоследствии обозначается новое направление — анализ исторических событий с привлечением природной информации (впоследствии он будет применять его и в других расследованиях — выяснении деталей маршрутов Р.Амундсена и Р.Скотта на Южный полюс, экспедиции В.Баренца). В предисловии к книге он пишет об этом так: «Как полевик, имеющий маршрутный опыт, я вскоре понял, что каких-либо серьезных претензий к человеку, который завладел моими мыслями, я предъявить не могу. Во всяком случае, чего-то необъяснимого в маршруте Кука я не отыскал. Другое дело — природная обстановка...»

Необходимо было тщательно «просеять» информацию через частое сито анализа в попытке отделить зерно истины от плевел напраслины, а это было непростым делом. Но тем поразительней оказались выводы, ибо Кук в своих визуальных наблюдениях описывал то, что вошло в научную литературу о природных процессах в самых высоких широтах Арктики много десятилетий спустя...»

Инструментальные наблюдения показали, что в Северном Ледовитом океане определенным течениям соответствуют морские льды разной морфологии, возраста и генезиса. А их дрейф зависит от ветров, связанных с атмосферной циркуляцией, и т.д. По мере анализа текста Кука выяснялось, что природные осо-

бенности Центрального Арктического бассейна, где проходил его маршрут, определили многие события его похода.

Неверно рассчитав влияние дрейфа при возвращении с полюса (точнее, приняв на веру оценки Пири), Кук со своими спутниками двигался значительно медленнее и западнее своего продовольственного склада (оставленного на суше), что поставило его на грань гибели. Подвижки дрейфующих льдов по маршруту приходились на участки с наиболее интенсивными течениями — здесь он встретил и описал ледяные острова. А участки шельфовых ледников с характерной волнистой поверхностью находятся именно там, где он и указывал. В целом все, что описал Кук, начиная с первых шагов по припаю от мыса Столуэрты к полюсу и кончая возвращением на острова Канадского Арктического архипелага, строго соответствует природным процессам в Северном Ледовитом океане, и в этом его правота.

Та давняя публикация в «Природе» не прошла незамеченной в США, откуда был получен отзыв на статью. Оказалось, что существует Общество им.Ф.А.Кука, выступающее за признание его приоритета в достижении Северного полюса. Давно уже снято обвинение в фальсификации самого похода на полюс. Что касается других достижений Кука — участия в бельгийской антарктической экспедиции, восхождения на Мак-Кинли, путешествий на острова Канадского Арктического архипелага, — то их результаты уже проверены или проверяются защитниками доброго имени исследователя.

В книгу вошел анализ всех работ Кука, опубликованный в США и в нашей стране [3], документы и иллюстрации, предоставленные автору обществом. Эта поучительная история защиты американского полярника российским показывает, что при всех различиях научного поиска в разных странах мира их объединяет служение истине. ■

## Литература

1. Корякин В.С. Был ли Ф.Кук на Северном полюсе? // Природа. 1975. №7. С.74—83.
2. Кук Ф.А., Пири Р.Э. Открытие таинственного полюса / Сост. В.Розов, Цветков. М., 1910.
3. Кук Ф.А. Мое обретение полюса. М., 1987.

## Биология

**Ф.Хедрик.** ГЕНЕТИКА ПОПУЛЯЦИЙ. Пер. с англ. А.А.Лушниковой, Н.В.Петровой. М.: РИЦ «Техносфера», 2003. 592 с.

В последние десятилетия биология развивается столь стремительно, что любые учебные пособия быстро устаревают. Новое издание содержит как классические, так и современные данные популяционной и эволюционной генетики. Автор книги в течение многих лет ведет преподавательскую и экспериментальную работу, в частности, занимается исследованием малых популяций, в том числе редких и исчезающих видов.

Книга рассчитана как на подготовленных читателей, так и студентов, аспирантов, желающих расширить свои знания, поскольку это не только учебник, но и справочник для исследователей, содержащий используемые в популяционной генетике математические методы обработки результатов наблюдений.

Отличительная особенность нового издания — список электронных сайтов, где можно более подробно ознакомиться с последними разработками методов статистического анализа.

## Геология

**И.И.Голубева.** МАГМАТОГЕННЫЕ ФЛЮИДИЗАТНО-ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЕВЕРА УРАЛА. Отв. ред. Н.П.Юшкин. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 210 с.

Книга посвящена особой категории магматических горных пород Полярного и Приполярного Урала, магматогенным флюидизатам, и стала итогом многолетних (1989—2000) исследований автора.

В формировании магматогенных флюидизатов ведущая

роль принадлежит флюидной фазе или газовой, обособление которой было обусловлено взрывным или более длительным, но тем не менее интенсивным выделением растворенных в магме летучих компонентов. Их плотность зависит от специфического механизма перемещения материала и необычного многообразия текстурно-структурных особенностей и вещественного состава этих пород.

Уникальным объектом для изучения стала лемвинская гранитоидная вулканоплутоническая ассоциация, развитая на севере Урала, где флюидизаты представлены туффизитами и игнимбритами. Охарактеризованы их петрография, особенности химизма, геодинамическая позиция и история формирования.

Автор надеется, что книга станет кирпичиком в фундаменте становления нового направления — петрологии магматогенных флюидизатно-эксплозивных пород — и в этом начинании его поддержат другие исследователи.

## История науки

**АКАДЕМИК М.А.ЛЕОНТОВИЧ.** Ученый. Учитель. Гражданин. Сост. В.И.Коган, Л.К.Кузнецова, В.Д.Новиков. М.: Наука, 2003. 511 с.

К 100-летию со дня рождения вышло юбилейное издание, посвященное академику Михаилу Александровичу Леонтовичу (1903—1981) — выдающемуся ученому-теоретику, внесшему большой вклад в статистическую физику и физическую оптику, основателю крупных научных школ по радиофизике и физике высокотемпературной плазмы (см.: Природа. 2003. №3).

Воспоминания о Леонтовиче, написанные его коллегами, друзьями, учениками и родны-

ми, рисуют образ замечательного ученого, разработавшего государственно важные задачи и вместе с тем мужественно противостоявшего произволу власти. С его именем во многом связано долголетнее лидерство советской науки в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу и радиолокации.

Книга отражает атмосферу в среде советской интеллигенции и представляет большой интерес для оценки современного состояния науки в России.

## История науки

**М.А.Ковнер.** ГАНС ГУСТАВОВИЧ ГЕЛЬМАН. Отв. ред. В.П.Визгин. М.: Наука, 2002. 136 с. (Из сер. «Научно-биографическая литература».)

Более полувека умалчивалась судьба выдающегося ученого, физика-химика, Ганса Густавовича Гельмана (1903—1938), одного из основоположников квантовой химии.

Обучение и научную деятельность Гельман начинал в Высшей технической школе по электротехнике (Штуттгарт). Вынужденный эмигрировать из фашистской Германии, он переехал в СССР, где работал в Физико-химическом институте им.Л.Я.Карпова. Увольнение из института в 1938 г. — обвинение в шпионаже, расстрел в мае того же года — полная реабилитация в 1956 г.

Книга состоит из двух частей. В первой говорится о немецком периоде жизни Гельмана, во второй — о советском. Здесь есть полный перечень печатных трудов ученого, их краткое изложение, комментарий. Указан список литературы, использованной при написании книги. Опубликованы случайно сохранившиеся фотографии, относящиеся к различным периодам жизни Гельмана.

# Ботаник Александр Бунге

## К 200-летию со дня рождения



Встречи с забытым

А.К.Сытин,  
кандидат биологических наук  
Ботанический институт им.В.Л.Комарова РАН  
Санкт-Петербург

Александр Андреевич Бунге (1803—1890), ботаник, выдающийся флорист и великий систематик растений, не входит в круг наиболее цитируемых авторов. Как естествоиспытатель он был свидетелем развития ведущих парадигм своего века — в описательных дисциплинах линнеевскую систематику сменила натурфилософская концепция Ф.Шеллинга, позже утвердилось эволюционное учение Ч.Дарвина. Будучи профессором Дерптского университета, Бунге, очевидно, высказывал мнение об упомянутых доктринах, дабы разумным и зрелым скепсисом охладить пылкие умы склонных к крайностям студентов и указать верное направление их деятельности. Так могло быть... Но так ли было в действительности, мы не можем сказать с уверенностью, не располагая достоверными свидетельствами.

О достоинствах преподавания ботаники в Дерпте можно судить по уровню образованности выпускников медицинского факультета. Практикующие медики были знатоками лекарственных растений, а многие, как, например, военный врач Линдеманн, достигли значительных успехов в изучении флоры и обладали большими частными гербариями. С полным основанием можно приписать эти на-

выки влиянию школы профессора Карла Людвиг Ледебура, возглавлявшего кафедру ботаники; уроженец Северной Германии стал автором первой «Российской флоры». Большинство дерптских студентов были выходцами из Восточной Пруссии или Прибалтики, например Карл Мейер, впоследствии директор Петербургского Императорского ботанического сада, а в 1826 г. — товарищ Бунге по их первой экспедиции на Алтай. Оба начинающих медика соприкасались с опытом фармакогнозии в силу семейной традиции. Мейер в юности служил в аптеке; дед Бунге, Георг Фридрих, основатель киевской евангелиско-лютеранской общины, был владельцем частной аптеки в Киеве, которую завещал сыну Андрею. Внук Александр по окончании гимназии (1821) стал студентом Дерптского университета, где 24 ноября 1825 г. ему была присуждена степень доктора медицины.

Весной 1826 г. Бунге отправился на Алтай, куда вскоре прибыл профессор Ледебур в сопровождении доктора Мейера для естественнонаучного путешествия, целью которого стало изучение не только флоры и фауны, но и царства минералов, а также сбор этнографических и статистических сведений. Универсальность программы напоминала знаменитые Академические экспедиции XVIII в., и Леде-

бур, получивший благословение П.С.Палласа в Берлине в 1811 г., накануне поступления на службу в Россию, продолжал тем самым традицию изучения природы Сибири. Но характер науки XIX в. требовал уже не широты охвата описания природных объектов, а ограничения и глубины исследования. Поэтому Ледебур и его спутники, собрав богатые материалы, передали их в руки других специалистов, сосредоточив внимание на ботанических коллекциях. Погружение в труды предшественников (Ледебур предпринял успешную попытку идентификации долинныевской номенклатуры растений Иоганна Гмелина) и глубина таксономического анализа сделают «Flora Rossica» основополагающим ботаническим сочинением, сочетающим преемственность с новизной.

Избыток аптекарской точности, аккуратности и педантизма, свойственные Бунге и Мейеру, уравновешивали их энергия, предприимчивость, склонность к полевым наблюдениям, а главное — любовь к растениям. Как истинным дерптским буршам, им не был чужд идеализм помыслов, благородство характера и пылкость воображения. Кажется, с годами выпускники Дерпта реже становились самодовольными филистерами, чем студенты Гейдельберга или Бонна. Почему? Может быть, сказывалось влияние климата? Ветры ли Бал-

© А.К.Сытин



Александр Андреевич Бунге.

тийского моря вселяли в душу беспокойство и охоту к перемещению мест или знойное дыхание полуденных стран влекло к черноморским и каспийским берегам, уводило в глубины Азиатского континента? Пространство Российской империи взывало к познанию и вербовало все новых волонтеров.

Не только крепкое здоровье, но и редкая душевная гармония отличали киевлянина Бунге, русского немца в третьем поколении. Всегда доброжелательный и расположенный к людям, он умел находить общий язык и с кочующими киргизами, и с оседлыми алтайскими староверами. Последние признавали веселого доктора своим, невзирая на курение табака, почитавшееся великим грехом в раскольничьей среде. Так было на Алтае, где Бунге остался по окончании экспедиции, поступив на место уездного врача Барнаульского округа. Вскоре он стал заведующим Змеиногорским госпиталем, однако не оставлял естественнонаучных занятий, обрабатывал материалы путешествия и продолжал сотрудничать с Ледебуром в создании «Flora Altaica» (1829–1832). Судьба Бунге изменилась в 1829 г., когда прославленный

Александр Гумбольдт, путешествовавший по Алтаю, познакомился с ним и рекомендовал молодого ученого Петербургской академии наук. 3 мая 1830 г. Бунге был командирован в составе Российской духовной миссии в Монголию и Китай, где одним из первых начал изучать природу пустыни Гоби. В 1832 г. по поручению Петербургской академии наук исследовал Восточный Алтай (истоки рек Чуи, Чулышмана и Башкауза).

25 июля 1833 г. Бунге был назначен экстраординарным профессором ботаники в Казанский университет. Здесь, совершая поездки на юг Саратовской губернии и на север Астраханской, он изучал флору Нижней Волги. Ледебур, возвращаясь в Германию, горячо рекомендовал лучшего ученика в качестве своего преемника на должность заведующего кафедрой ботаники, и 22 февраля 1836 г. Бунге стал ординарным профессором Дерптского университета. Он читал курс лекций общей, фармацевтической и сельскохозяйственной ботаники и совмещал преподавание с обязанностями директора ботанического сада при университете, значительно увеличив коллекцию оранжерейных и дикорастущих экзотических растений. Бунге перевел на немецкий язык «Введение в изучение ботаники» А. Декандоля, изданное в 1838 г. в Лейпциге с многочисленными дополнениями. В 40–50-е годы он исследовал флору Прибалтики. Значительным этапом в изучении флоры Средней Азии стала обработка ботанических коллекций путешественника Александра Леманна, выполненная Бунге. Он получил их согласно завещанию покойного исследователя и благодаря посредничеству петербургского академика Карла Бэра.

19 декабря 1857 г. Бунге и его помощник Теофил Бинерт стали участниками Хорасанской экспедиции, снаряженной Русским географическим обществом под руководством востоковеда

и дипломата Н.В.Ханыкова в центральную часть Иранского нагорья. Несколько отрывков из путевого отчета Бунге позволяют оценить степень наблюдательности исследователя: «Вряд ли где-либо встречается более резкая противоположность между растительностью соседних флор, как при переходе северной страны Альбурса (хр. Эльбурс. — А.С.) на южный его склон. Если где в других местах некоторые формы известной флоры и исчезают вовсе, то мало-помалу и постепенно заменяются новыми. Здесь же вовсе нет никакого перехода одной флоры в другую; почти буквально одним шагом переступаешь в совершенно иную растительность. Едва ли хоть одно из растений, попадавшихся нам при поднятии на Сиа-хане, повстречалось нам при вступлении нашем на юго-западный или южный склон» (с.93). «Необыкновенная сухость воздуха и почвы, при уменьшенном давлении воздуха, порождает здесь совершенно особую растительность. Низкие, весьма сильно и, так сказать, растопыренно разветвленные кустарники с толстыми, глубокими корнями, с листьями, имеющими мало развитые, часто колючие пластинки или черешки, образуют, придавленные к земле, род подушек, то более широких, то почти полукруглых. Так именно в то время по преимуществу стоящие в роскочном и великолепном цвете *Onobrychis cornuta*, виды *Astragalus* из группы *Tragacantha*, *Acantholimon* и *Acanthophyllum*, еще не цветущие, *Prunus prostrata*, уже отцветшая, и на самых высоких вершинах густые, жесткие, почти на камень похожие подушки нецветущей *Dionysia*. Между этими подушками земля обыкновенно совсем нагая: более нежные, частью однолетние растения из родов *Draba*, *Galium*, *Veronica*, *Euphorbia*, некоторые виды *Astragalus* теснятся, будто ища защиты, вокруг этих подушек, которые в состоянии удерживать в почве некото-

рую влажность. Редко попадают между ними луковичные растения, как то *Ornithogalum*, *Tulipa*, *Allium*, *Muscari*, или вечно зеленые, как то *Vinca*, первые в своих луковицах, вторые в своих жестких листьях накапливают достаточно питательного вещества для перенесения засухи. Ниже являются волчецовидные растения, принадлежащие преимущественно к роду *Cousinia*, в то время еще не цветущие, с мало развитой мякотью листьев и сильными шипами. 500-ми футами ниже начинается древесная растительность, но не листовая, как на северном склоне, а исключительно хвойная; единственным ее представителем является один вид можжевельника (*Juniperus*), сначала в тощих, а потом нередко в весьма толстых стволах (так был замечен ствол о 19 футах в обрубке). Эти деревья имеют расширенную крону, но никогда не достигают значительной высоты; хотя они и растут во множестве, но стоят так редко, что нельзя собственно сказать, что они образуют лес» (с.94). «Одним словом вся растительность имеет характер неподвижности, жесткости и по своим шипам какой-то недоступности» [1].

Физиономичность признаков, на которые обращает внимание Бунге, рисуя характер растительного покрова, флористический принцип, лежавший в основе разграничения фитоохорий, внимание к количественным характеристикам — высоте над уровнем моря или толщине ствола можжевельника — черты, составляющие особенность ботанико-географического метода Бунге. Результаты исследований, проводимых в Хорасанской экспедиции разными специалистами (геологом, зоологом, физиком, топографом), были принципиально иными, чем в путешествиях прежних

лет, что способствовало рождению нового комплексного метода изучения природы. Об этом свидетельствует заметка Ханькова от 28 июня 1858 г. «Мы прибыли в Маадан в сумерки, и первое, что привлекло мое внимание, были копны сена необычной формы, сложенные у домов. Г-н Бунге установил, что высушенная трава — это *Gundelia turnefortii*, по местному «chlora»; ее заготавливают на зиму в качестве корма для ослов и овец. Этот факт свидетельствует о том, что зима здесь более суровая, чем в других местах Персии, где обычно к таким предосторожностям не прибегают. Животные очень любят это горьковатое на вкус растение, и оно считается неплохим кормом» [2].

Экспедиция осуществляла картографическую съемку местности, используя самые современные технические средства, определяя координаты, проводя барометрические и геомагнитные наблюдения, а потому полученные данные с точными геологическими и гипсометрическими расчетами о распределении растительности стали значительным достижением. Но немаловажным фактором успеха была универсальная специализация участников экспедиции, позволявшая им выполнять разные профессиональные задачи. Сам Бунге, совершив с небольшим отрядом длительную экскурсию из Герата в Тебес, составил карту северного окончания Восточно-Иранских гор. Военный конвой из 20 человек защищал их от нападения бандитов: «С заходом солнца мы сели на лошадей, к сожалению, скоро смерклось, а при лунном свете нельзя было порядочно различить растения». Путешественники совершали утомительные 20-часовые переходы. Разбив лагерь, т.е. разостлав ковры на бе-

регу ручья, они выставляли караул, настороженно прислушиваясь к тишине. «Ночь была страшная, буря не успокаивалась, и мы не могли согреться в шубах и под одеялами. Мы пустились опять в дорогу еще до рассвета, чтобы несколько согреться и не оцепенеть совершенно от холода, мы попеременно ехали верхом или шли пешком. Ветер переменялся с северного на восточный и постепенно стих, налево ясно стал выставляться Гурианский хребет» (с.123). «Спустя полных семь недель, мы прибыли в Герат 18/30 ноября (день годовщины моего въезда в Пекин в 1830 г.) Добыча растений была невелика, но при том мы собрали более 70 видов, недостававших нам еще» (с.124).

В 1865 г. вышла монография Бунге, посвященная роду *Cousinia* (*Compositae*). Прежде было известно только 10 видов этого среднеазиатского растения. Бунге описал 126 видов, из которых 26 были открыты самим автором во время путешествия в Персию. Затем последовала монография об астрагалах Старого Света (1868—1869), где Бунге не только описал 964 вида *Astragalus* (и в том числе 260 новых, из которых около 85 собрано во время Хорасанского путешествия), но и создал филогенетическую систему этого рода, не устаревшую до настоящего времени.

В конце 1867 г. Александр Андреевич Бунге ушел в отставку, погрузившись в обработку собранных материалов, последние годы его жизни были удивительно плодотворными. Выдающийся флорист, систематик, путешественник, член-корреспондент Петербургской академии наук, член Линнеевского и Лондонского Королевского обществ умер в своем имении Мятлино (Эстония) и похоронен в Тарту. ■

## Литература

1. Отчет А.А.Бунге // Вестн. Императ. Рус. геогр. об-ва. Ч.25. Вып.4. 1859.
2. Ханьков Н. Экспедиция в Хорасан. М., 1973.