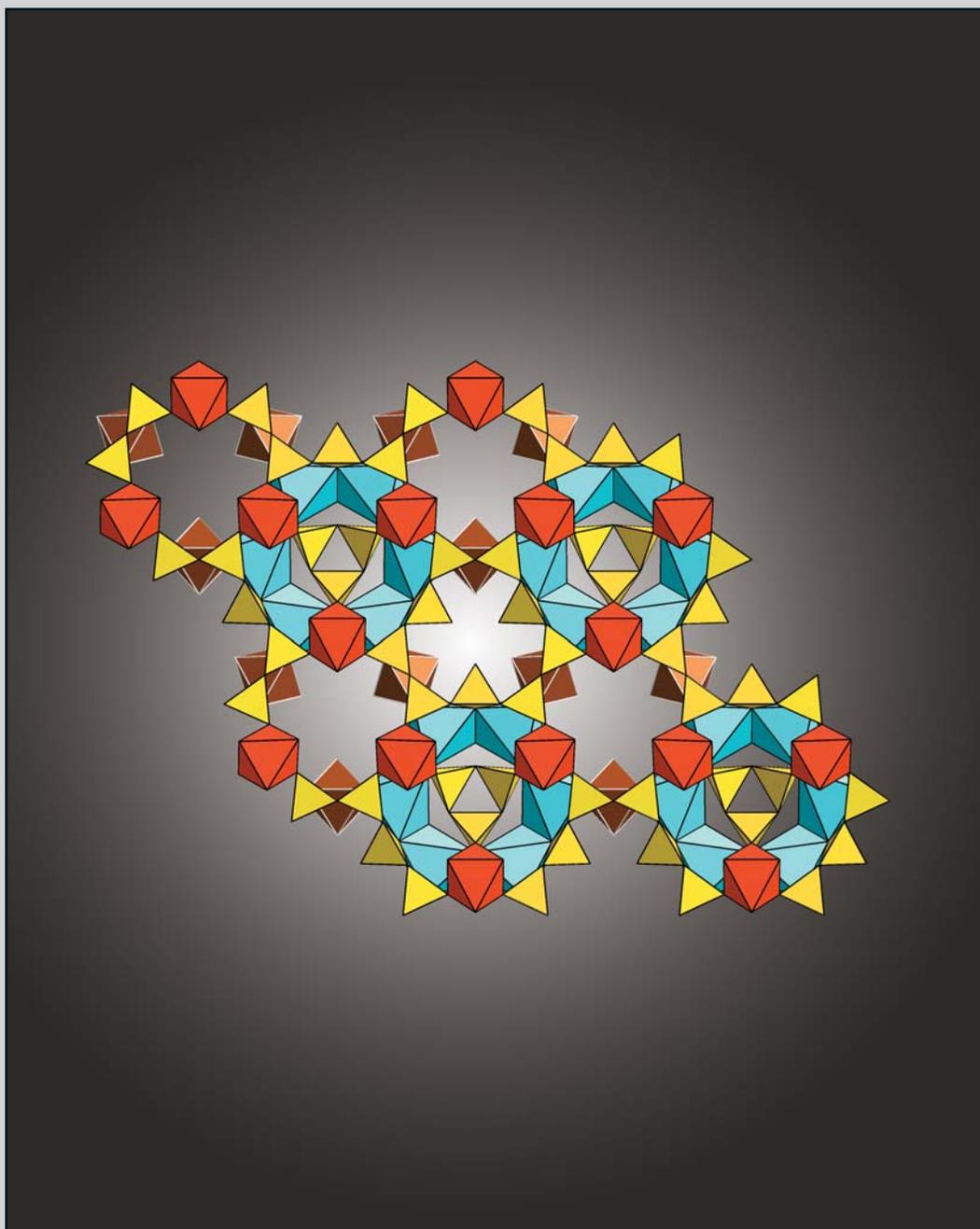


# ПРИРОДА

1 14



**В НОМЕРЕ:****3 Сунцов В.В.****Происхождение чумы:  
экологический сценарий**К 120-летию открытия А.Йерсеном  
и Ш.Китазато микроба чумы *Yersinia pestis*

*Возбудитель чумы открыт в 1894 г., а к 1960-м годам была сформулирована теория природной очаговости этого заболевания. Однако на рубеже XX и XXI вв. выяснилось, что основное положение теории — о древнем происхождении чумы — ошибочно. На вопрос «когда она возникла?» смогли ответить молекулярные генетики, а «где?» и «как?» — эволюционные экологи.*

**15 Свиточ А.А.****Маныч: история древних проливов**

*В прошлые геологические эпохи между Черным и Каспийским морями неоднократно возникали проливы. Следы недавних можно увидеть в современном рельефе Манычской низменности, о более древних — узнать из материалов геологического бурения.*

**24 Беленицкая Г.А.****Мифы как отражение жизни  
соляных недр Мертвого моря**

*Отражает ли библейская легенда о гибели городов Содомы и Гоморры реальное геологическое событие? На этот вопрос есть достаточно уверенный утвердительный ответ.*

**Научные сообщения****31 Антонов А.Л., Книжин И.Б.****Загадка амурского хариуса****Кузин А.Е.****Непрошенный гость — лисица  
на острове Тюленьем (38)****42 КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ЗНАКОМАЯ  
И НЕЗНАКОМАЯ**

К Международному году кристаллографии

*Сто лет назад с помощью дифракции рентгеновских лучей удалось впервые расшифровать атомную структуру кристалла. Наступивший 2014-й Организация Объединенных Наций объявила Международным годом кристаллографии, что дает хороший повод вспомнить путь, пройденный этой наукой, и рассказать о последних результатах исследований — как традиционными, так и новыми методами.*

**Шагина Н.М.****Предыстория Института  
кристаллографии АН СССР (43)****Расцветаева Р.К.****Минералогия  
в физическом институте (52)****Толстихина А.Л., Сорокина К.Л.,  
Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В.****Что видит атомно-силовой  
микроскоп? (62)****73 ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ  
2013 ГОДА****Рубаков В.А.****По физике — Ф.Энглер и П.Хиггс****Атауллаханов Ф.И.****По химии — М.Карплус, М.Левитт  
и А.Уоршел (79)****Корнилова Е.С.****По физиологии или медицине —  
Дж.Ротман, Р.Шекман  
и Т.Зюдоф (83)****Биография современника****88 ОН «ОТКРЫВАЛ ГЛАЗА ДУШИ»**

Валерий Иванович Булавинцев

**Васильева Н.П.****Искренний и естественный в мыслях  
и действиях (89)****Забугин В.В.****Страстный фотоохотник (90)****95****Новые книги**

## CONTENTS:

- 3** **Suntsov V.V.**  
**Origin of Plaque: Ecological Scenario**  
 To 120th Anniversary of Discovery  
 by A.Yersin and Sh.Kitazato  
 of Plaque Bacteria *Yersinia pestis*

*The plaque pathogen was discovered in 1894, and in early 1960es the theory of natural foci of this disease was formulated. But at the turn of the 20th and 21st century it became clear that the main provision of this theory about ancient origin of plaque is erroneous. The question «when it originated?» was answered by molecular biology, and the questions «where?» and «how?» by evolutionary ecology.*

- 15** **Svitoch A.A.**  
**Manych: History of Ancient Straits**  
*During previous geologic periods the straits between Black Sea and Caspian Sea have emerged several times. The traces of recent straits can be seen in modern relief of Manych lowland, and we can get information on more ancient ones from the results of geologic drilling.*

- 24** **Belenitskaya G.A.**  
**Myths as a Reflection of Life**  
**of the Dead Sea Salt Depths**  
*On the question «Could the Bible legend about destruction of cities Sodom and Gomorrah be a reflection of a real geologic event?» it is possible to give a sufficiently affirmative answer.*

### Scientific Communications

- 31** **Antonov A.L., Knizhin I.B.**  
**A Riddle of Amur Grayling**  
**Kuzin A.E.**  
**Unwelcome Guest:**  
**Fox at Tulenij Island (38)**

## 42 CRYSTALLOGRAPHY KNOWN AND UNKNOWN

To International Year of Crystallography

*Hundred years ago, for the first time the solution of the atomic structure of a crystal was made using X-rays diffraction. This year 2014 was declared by UN the International Year of Crystallography, which provides a good occasion to remind a long way this discipline has made and to describe the latest results obtained in this field by both traditional and new methods.*

- Shchagina N.M.**  
**Prehistory of Institute**  
**of Crystallography USSR Academy**  
**of Sciences (43)**

- Raszvetaeva R.K.**  
**Mineralogy at a Physical Institute (52)**

- Tolstikhina A.L., Sorokina K.L.,**  
**Belugina N.V., Gainutdinov R.V.**  
**What Does Atomic Force**  
**Microscope See? (62)**

## 73 2013 NOBEL PRIZE WINNERS

- Rubakov V.A.**  
**In Physics – F.Englert and P.Higgs**

- Ataullakhanov F.I.**  
**In Chemistry – M.Karplus, M.Levitt**  
**and A.Warshel (79)**

- Kornilova E.S.**  
**In Physiology or Medicine –**  
**J.Rothman, R.Schekman**  
**and T.Südhof (83)**

- 88** **HE «OPENED EYES OF SOUL»**  
**Valerij Ivanovch Bulavintsev**

- Vasil'eva N.P.**  
**Sincere and Natural in Thoughts**  
**and Deeds (89)**  
**Zabugin V.V.**  
**Passionate Photographer (90)**

- 95** **New Books**

# Происхождение чумы: экологический сценарий

К 120-летию открытия А.Йерсеном и Ш.Китазато микроба чумы *Yersinia pestis*

В.В.Сунцов

Возросший в последние годы интерес ученых к вопросам происхождения болезнетворных микроорганизмов обусловлен возможным появлением в измененной человеком среде новых и возвращением «забытых» болезней, в перечень которых вошла чума. Всплеск интереса к ее возбудителю был инициирован террористической выходкой, совершенной в 2001 г. в США с применением бактериологического агента — сибиреязвенного микроба. Его, как и микроба чумы, относят к особо опасным для человека патогенам, которые могут использоваться в качестве биологического оружия. Значит, сегодня перед мировой наукой стоит задача расшифровать молекулярные процессы, формирующие свойства таких болезнетворных микроорганизмов. Для ее решения нужны адекватные исследовательские модели, и одна из них — чума.

## Немного истории

Первые упоминания о чуме (или чумоподобной инфекции) известны из Первой книги Царств Библии, где говорится о «вселенском море», охватившем население ближневосточных городов Азот, Геф, Аскалон, Ашдод, Вефсамис во время войны филис-



**Виктор Васильевич Сунцов**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН. Занимается изучением происхождения и эволюции возбудителей природноочаговых инфекций, в частности чумы.

тимлян с израильянами в 1200 г. до н.э. Болезнь сопровождалась тотальным падежом «мышей» и появлением на теле больных людей «наростов» (бубонов). С той далекой поры и до наших дней загадка происхождения чумы занимает прогрессивные умы человечества. История насчитывает сотни чумных эпидемий и эпидемических вспышек [1]. Но относительно полные сведения имеются лишь о двух последних пандемиях. Первая из них, «черная смерть», выйдя

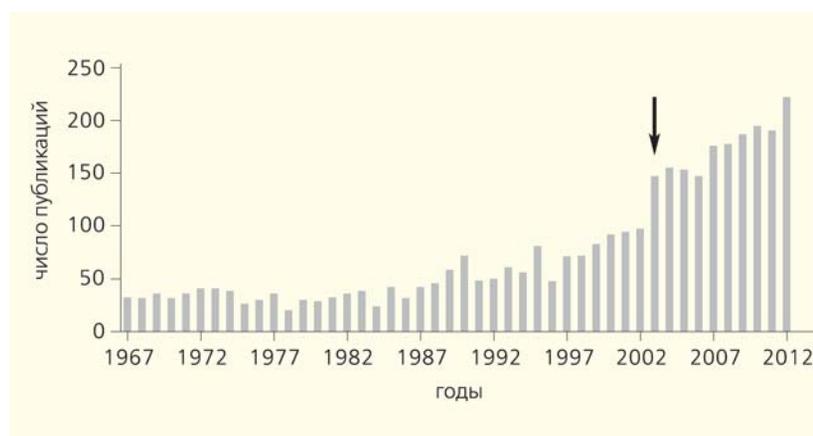
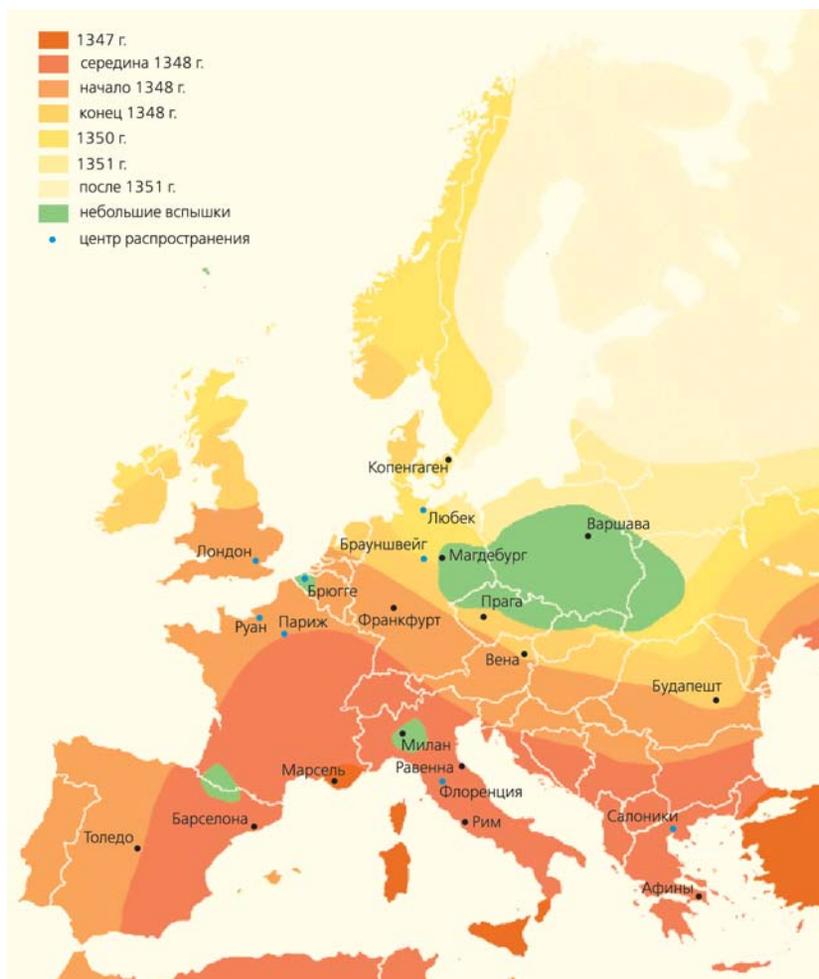


Диаграмма публикаций по проблеме чумы, фиксирующая скачок их числа с 2003 г.

© Сунцов В.В., 2014



Карта распространения чумы в Европе. Пандемия, начавшаяся в центральных районах Азии, достигла берегов Черного моря в 1347 г.



Пандемия «черная смерть». Чума бубонной формы.

из глубин Центральной Азии, охватила нижнее Поволжье, Причерноморье, Ближний Восток, Европу, в Северной Африке распространилась по Средиземноморью и оттуда по долине Нила углубилась к югу континента до Килиманджаро. Последняя началась в конце XIX в. в Гонконге, откуда корабельные крысы разнесли чуму по всему миру и она охватила более 80 морских портовых городов. В Африке и в Новом Свете с домовыми грызунами возбудитель проник в глубь континентов, где внедрился в природу и обосновался в виде устойчивых вторичных природных очагов [2, 3].

Целители и врачи в глубокой древности задумывались над секретами неожиданного, словно «из-под земли», возникновения чумных эпидемий в разных странах и на разных континентах, но понять причины этого явления стало возможным только благодаря созданию теории природной очаговости чумы. Для этого науке об инфекциях понадобилось пройти исторический путь длиной более столетия.

Начало действительно научному подходу к познанию чумы положили 120 лет назад А.Иерсен и Ш.Китазато. В 1894 г. в Гонконге в начале третьей пандемии они открыли возбудителя этой инфекции — микроб *Bacteria pestis* (позднее — *Pasteurella pestis*, а с 1967 г. — *Yersinia pestis*), доказав тем самым микробную этиологию болезни. В 1906 г. Английская комиссия, созданная для выяснения причин пандемии в колониальной Индии и разработки методов борьбы с ней, установила носительство чумного микроба синантропными грызунами (серой и черной крысами, домовыми мышью, бенгальской и индийской бандикотами). Казалось бы, версия о чуме как исходной болезни синантропных крыс получила надежное обоснование. Но уже через несколько лет, в 1911 г., Д.К.Заболотный в Забайкалье выделил возбу-

теля чумы в популяциях дикого грызуна сурка тарбагана (*Marmota sibirica*), обитающего в малонаселенных степных и горностепных ландшафтах Южной Сибири и Центральной Азии. В 1920–1930-х годах Ву Лиен-те, работая сначала в крысиных очагах многих стран мира, а затем в глубинах Центральной Азии, в удаленных от цивилизации очагах «тарбаганьей болезни», предположил, что она возникла именно в этих местах, причем очень давно [4]. Эта гипотеза, не обоснованная какими-либо весомыми аргументами, была широко поддержана во многих научных публикациях. В них авторы связывали древность возбудителя с филогенетической древностью сурков — первичных, по их представлениям, хозяев чумного микроба.

К середине XX в. был накоплен большой объем знаний по эпидемиологии, эпизоотологии, клинике болезни, ее распространению в мире, дано определение природного очага чумы и сформулированы, хотя и не бесспорно, основные положения теории. Ее фундамент стал закладываться Заболотным на основании сведений, полученных им при изучении маньчжурской вспышки в 1898 г., а к 1960-м годам теория приобрела вполне логичный вид. Чума предстала как древняя болезнь норových грызунов, возникшая в олигоцене-миоцене-плиоцене в аридных районах Палеарктики (или Голарктики), передающаяся трансмиссивным путем с участием «блокированных» блох. Со временем возбудитель инфекции по межконтинентальным сухопутным мостам (берингийскому, синайскому и панамскому) попал на все континенты мира, исключая Австралию и Антарктиду. Однако сегодня эта версия о естественном проникновении возбудителя чумы в Новый Свет из Северной Азии мало популярна, а преобладает идея его антропогенной интродукции морским путем во время последней, третьей пандемии. В наши дни чумной микроб существует на четырех континентах в многочисленных природных очагах в популяциях более 200 видов диких норových млекопитающих.

На основе этой господствующей гипотезы о месте и времени появления чумного микроба выстраивались и увязывались «классические» положения теории: медленное коэволюционное формирование микроба и среды его обитания — аридных ценозов Северного полушария (степей, горных степей, полупустынь, пустынь), с которыми связана эволюция сурков, сусликов, песчанок, пищух, полевок.

В последнюю четверть XX в., по мере появления новых экологических, палеоклиматических и других фактов, а также совершенствования молекулярных методов исследования, стало ощущаться несовершенство теории природной очаговости, накапливались и обострялись противоречия. Одно из них — толкование адаптивной сущности трансмиссивной передачи возбудите-

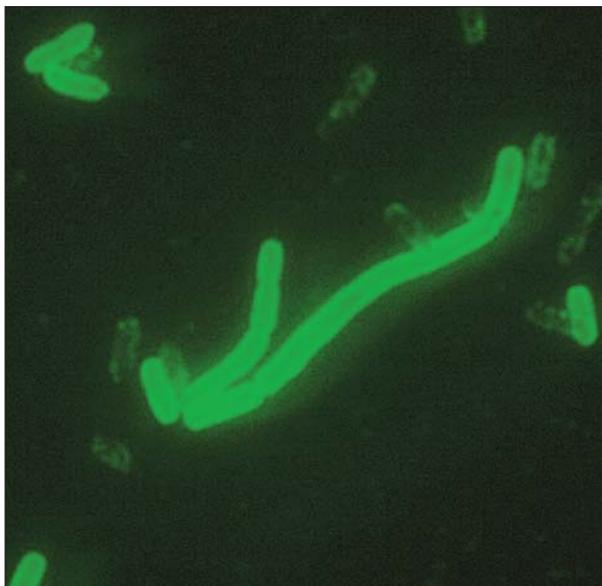


«Черная смерть». Гравюра П.Фюрста, 1656 г.

ля блохой, у которой в просвете пищеварительного тракта образуется блок размножающимися бактериями. Парадокс состоит в том, что «блокированная» блоха живет всего несколько дней и умирает от голода. Такой механизм трансмиссии вряд ли можно считать эволюционно отточенным. Противоречия в теории множилось быстро, и на рубеже XX и XXI вв. «красивая» теория природной очаговости чумы дала сбой. Принципиально новую идею относительно времени появления возбудителя выдвинула молекулярная генетика.

### Когда появился микроб чумы?

Доказанное в 1980 г. молекулярными методами непосредственное родство псевдотуберкулезного (*Y.pseudotuberculosis*) и чумного (*Y.pestis*) микробов привело к выводу об их недавней дивергенции, правда, без указания времени и места, когда именно и где это случилось [5]. Высокое сходство их геномов позволяло некоторым авторам даже объединить их в один вид в качестве отдельных подвидов, хотя вызывают они совершенно разные болезни. И псевдотуберкулезного, и чумного микробов относят к семейству Enterobacteriaceae — возбудителям кишечных инфекций, но послед-



Микрофотография чумной палочки. Увел.  $\times 200$ .

[www.cdc.gov](http://www.cdc.gov).

ний, будучи паразитом крови, не имеет к ним никакого отношения. У него иная адаптивная среда, и в принципе его нужно отнести к другому семейству [3].

Идея недавнего отделения чумного микроба от псевдотуберкулезного была неожиданной, но отнюдь не новой. В 1950—1970-х годах такие мысли высказывали В.Н.Беклемишев, В.А.Бибикова, А.И.Дятлов, Л.Н.Классовский, В.С.Петров, Н.М.Хрущевская. Но тогда подобные интуитивные ощущения эволюционной молодости возбудителя чумы выглядели теоретически чуждыми, паранаучными и деструктивными, поэтому они не нашли поддержки у ортодоксов.

В 1999 г. М.Ахтман с соавторами опубликовали результаты своих генетических исследований [6]. После этой, можно сказать, революционной статьи в течение нескольких лет почти все работы о чумном микробе включали тезис: «возбудитель чумы *Yersinia pestis* произошел от возбудителя псевдотуберкулеза *Y.pseudotuberculosis* 20000—1500 лет назад», т.е. в конце позднего плейстоцена или голоцене. Точность такой датировки, рассчитанной методом «молекулярных часов», позволяла выстраивать дальнейшие экологические следствия. Указанный Ахтманом верхний временной предел происхождения чумного микроба (1500 лет назад) можно игнорировать, как и идею автора о зарождении микроба в земледельческих районах долины Нила в популяциях экзоантропной травяной мыши (*Arvicanthhis niloticus*). Разносторонние факты надежно свидетельствуют об отсутствии какого-либо вмешательства человека в этот естественный процесс. Несомненно, это был дикий микроб. Нижний временной предел (20 тыс. лет назад) — конец позднего плейстоцена — более правдоподобен. Тогда,

во время максимального похолодания в Северной и Восточной Азии, зона «вечной» мерзлоты продвинулась на юге до Гобийской пустыни. На территории Северной, Восточной и Центральной Азии этот период именуют сартанским временем (22—15 тыс. лет назад). Полагаю, что районом происхождения возбудителя чумы стала Центральная Азия — уникальная психроаридная область, где «вечная» мерзлота сомкнулась с пустыней, где холодно и сухо.

Вслед за статьей Ахтмана появилась публикация М.Скурника с соавторами, указывающая на непосредственного предка чумного микроба [7]. Им оказался сапрозоонозный психрофильный псевдотуберкулезный микроб 1-го (O:1b) серотипа, преобладающий в органике внешней среды (моче, экскрементах животных). В холодных районах Сибири, Дальнего Востока и Центральной Азии этот серотип вызывает у людей дальневосточную скарлатиноподобную лихорадку (ДСПЛ), которую еще называют болезнью из холодильника. Чаще ею заболевают люди, употребляющие немывтые продукты (фрукты, овощи), хранившиеся в овощехранилищах и холодильниках, доступных грызунам. «Молекулярные часы» и ареал возбудителя ДСПЛ в обширном регионе азиатской «вечной мерзлоты» позволяют ориентировочно отнести время его возникновения к началу плейстоцена, когда в связи с всеобщим похолоданием на Земле началось обширное оледенение Северного Ледовитого океана [3, 6].

К концу XX в. набралось множество научных фактов, подтверждающих недавнее происхождение микроба чумы от возбудителя псевдотуберкулеза 1-го серотипа, и потому выводы Ахтмана и Скурника были подхвачены широким кругом исследователей. Итак, на вопрос «когда?» был получен вполне правдоподобный «молекулярно-генетический» ответ. А на вопросы «где?» и «как?» смогла ответить эволюционная экология (при поддержке других классических направлений естествознания).

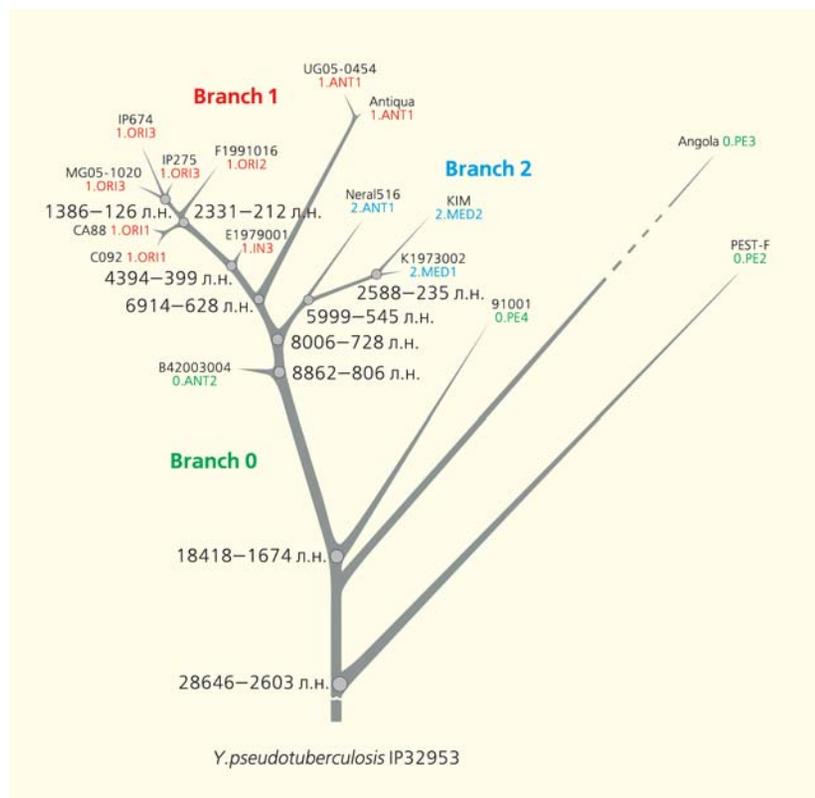
## Головокружение от успехов

К началу XXI в. выяснилось, что одно из основополагающих положений в теории природной очаговости чумы (филогенетическая древность возбудителя) ошибочно. Это подстегнуло научный ажиотаж, и среди ученых ведущих стран мира, включая Россию с ее полуразрушенной противочумной системой, началась настоящая гонка за приоритетом в раскрытии происхождения чумы как молодой инфекции. Возглавили эту гонку молекулярные генетики — такова сейчас «мода» эволюционной биологии.

В современных исторических реконструкциях в биологии доминирует новая филогенетика (молекулярная филогенетика, генофилетика). Отчас-

ти это лидерство оправдано широкими возможностями, которые предоставляют молекулярные структуры и компьютерные технологии филогенетических построений, позволяющие сравнивать и обрабатывать миллионы признаков, — таких как последовательности нуклеотидов. Все составляющие новой филогенетики полезны, они необходимы для создания естественных филогенетических схем, но недостаточны, особенно в отношении прокариот. Молекулярная генетика — молодая наука, и закономерности молекулярной эволюции пока не вполне ясны. Филогенез можно выстраивать только по гомологичным признакам, а их выявление, в том числе и на молекулярном уровне, представляет немалую проблему. Выводы на основе применения разных молекулярногенетических методов далеко не однозначны, порой не согласуются между собой и с данными других наук: экологии, биогеографии, микробиологии и др. Такая обескураживающая разногласия свойственна и заключениям в отношении микроба чумы.

Успехи в изучении молекулярногенетической структуры бактерий рода *Yersinia* и их диагностики несомненны. По специфическим молекулярным маркерам можно определить и охарактеризовать чумного микроба из любого природного или антропогенного очага (даже какой-либо отдельной его части), можно также дифференцировать множество его внутривидовых популяционных форм, приспособленных к какому-либо одному хозяину или к нескольким видам хозяев. Но генетические маркеры позволяют выявлять и ранжировать кластеры признаков и строить только деревья генов, отражающих эволюцию отдельных признаков или морфо-функциональных систем (отдельные семофилезы). Однако выстраивать по отдельным маркерам-признакам цельные филогенезы — дело сомнительное, рискованное и ненадежное. Молекулярногенетические различия позволяют судить о структуре внутривидового разнообразия, но не о его причинах и путях формирования. Таким образом, все молекулярногенетические филограммы, сценарии происхождения и эволюции микроба чумы — лишь частные семофилезы, отдельные схемы преобразования каких-либо «удобных» признаков, не более чем «вариации на тему» про-



Наиболее популярное в настоящее время филогенетическое древо, построенное на основе «удобных» молекулярных маркеров [8]. По данным молекулярной генетики, в его основании находятся наиболее древние «полевковые» подвиды (O.PE2, O.PE3, O.PE4). Названия биоваров микроба чумы: *antiqua* (древний); *MED* — *mediaevalis* (средневековый); *ORI* — *orientalis* (восточный); л.н. — лет назад.

исхождения возбудителя чумы. Филогенезы с экологической (адаптационной) точки зрения, — это множество комбинаторных, сложно взаимодействующих семофилезов. Филогения — история конкретной группы, и познается она только через ее результаты. Ими служат признаки и функции организмов, включая морфологические, поведенческие, физиологические, биохимические, молекулярногенетические, а также отношение организмов к абиотическим и биотическим факторам среды, распространение в пространстве и времени и т.д. Значит, чтобы получить и проанализировать цельные совокупности таких комбинаций, нужны годы и годы напряженных кропотливых совместных классических и молекулярногенетических исследований.

Сегодня в среде молекулярных генетиков популярна филогенетическая схема, в которой «полевковые» подвиды микроба чумы, циркулирующие в популяциях полевок (подсемейство *Microtinae*) и пищух (род *Ochotona*), рассматриваются как наиболее древние примитивные формы, промежуточные между предковым псевдотуберкулезным и дочерним чумным микробами. Действительно, по

ферментации сахаридов рамнозы (Rha+) и мелибиозы (Mlb+) и по некоторым другим признакам эти подвиды сходны с псевдотуберкулезным микробом [8]. Поэтому вопрос о происхождении чумы молекулярные генетики сейчас ставят примерно так: что именно не более 20 тыс. лет назад привело к преобразованию психрофильного сапрозоонного псевдотуберкулезного микроба 1-го серотипа, циркулирующего в популяции(ях) полевков, в новый филум микроба чумы? Но с экологической точки зрения, ни постановка вопроса в такой форме, ни сама филогенетическая схема, ни прокламирование исторического приоритета полевковых подвидов не выдерживают элементарной критики.

Сценарии происхождения, эволюции и распространения чумного микроба в мире, созданные на основе молекулярногенетических филограм, как правило, избыточно субъективны. В зависимости от выбранных генетических маркеров считается, что возбудитель мог возникнуть на Кавказе, либо в горах Памира, в Китае, или на Африканском континенте. Однако ни одна из версий не согласуется ни с известными «классическими» фактами, ни с молекулярногенетическими данными.

Так, ареал псевдотуберкулезного микроба 1-го серотипа приурочен к холодным районам Северо-Центральной Азии и Дальнего Востока; значит, именно там логично искать истоки чумы. Известно также, что псевдотуберкулезный микроб способен синтезировать необходимые для метаболизма аминокислоты из неживой органики внешней среды; а «полевковые» подвиды чумного микроба по биохимическим показателям, в сравнении с «сурковыми», «сусликовыми», «песчанковыми», более зависят от организма хозяина, специализированы к нему и, соответственно, должны быть наиболее молодыми [9]. Кроме того, по генетическим признакам в «полевковые» подвиды объединены микробы, циркулирующие в популяциях полевков (отряд Rodentia) и пищух (отряд Lagomorpha), существенно отличающихся по физиологическим и биохимическим характеристикам! Наконец, псевдотуберкулезный микроб не передается здоровому грызуну напрямую от больного, чтобы стать инвазивным, он должен пребывать некоторое время в холодной внешней среде, т.е. заражение происходит только пищевым путем. Значит, переход свободноживущего псевдотуберкулезного микроба в организм теплокровных полевков за короткое в эволюционном масштабе время должен быть совершиться скачкообразно из внешней среды (мочи, экскрементов) в кровь полевков, с температурой тела около 37°C. Для описания такого одноактного видообразования используют концепцию горизонтального переноса специфических плазмид чумного микроба *pFga* и *pPst*. Но, с одной стороны, такое одноактное видообразование в природе вполне справедливо ставится под сомнение последователями

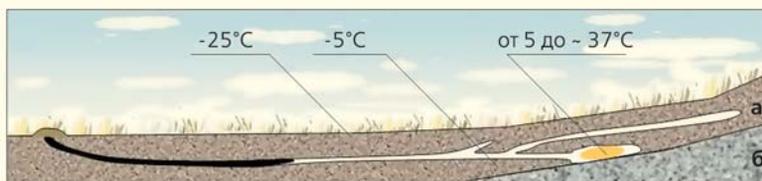
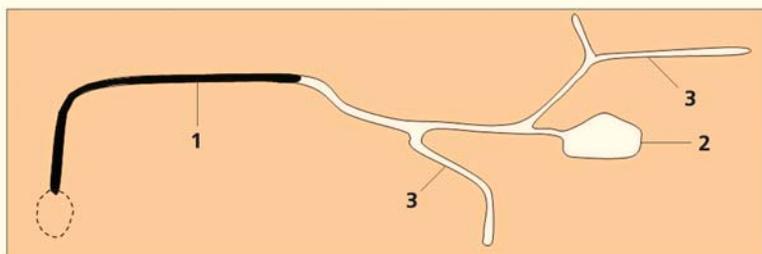
синтетической теории эволюции, с другой стороны, надежных случаев встраивания «экзогенов» в геном чумного микроба в естественных условиях не описано.

Колоссальные достижения в изучении геномов бактерий рода *Yersinia* и их диагностики вызвали в среде молекулярных генетиков «головокружение от успехов». Окрыленная триумфальными успехами молекулярная генетика, как всякое новое «модное» и быстро развивающееся направление, замахнулась единолично решить все проблемы построения филогенетического древа рода *Yersinia*. К великому сожалению, эти исследователи, воспринимая «классику» как отживший архаичный натурализм, сосредоточились на своих лабораторно-инструментальных подходах и методах. Несмотря на «агрессивную» экспансию в эволюционной биологии и амбициозные притязания молекулярных генетиков, единолично решить все проблемы происхождения чумы им не под силу. Генофилетика — не особый, успешный и всемогущий раздел филогенетики, а главным образом это источник определенного рода новых и перспективных данных. Новая молекулярная филогенетика, оперирующая этими данными, вместе с классической филогенетикой должны прийти к единому непротиворечивому толкованию любых фактов-признаков и их связей. Это и будет означать открытие эволюционного принципа, экологического и молекулярногенетических механизмов происхождения и эволюции возбудителя чумы.

### Происхождение *Yersinia pestis*: взгляд натуралиста

Отсутствие единого хорошо обоснованного подхода к пониманию истории чумы создает переизбыток молекулярногенетической информации, привлекаемой порой невпопад для филогенетических построений. Выручила «классика», которая, казалось бы, уже исчерпала себя в этом вопросе. Прежде всего — экология, точнее экология монгольского сурка тарбагана и ее специфического паразита, блохи *Oropsylla silantiewi*. Этим объектам мы посвятили треть века наших исследований.

Знание экологии монгольского сурка и его блох позволяет понять селективные (адаптационные) процессы, проходившие в микробных популяциях в природе, и причинно-следственные связи в эволюционных филумах. Появление возбудителя чумы в Центральной Азии предопределили два природных фактора: аридность горно-степных ландшафтов, постепенно увеличивающаяся с олигоцена—миоцена, и максимальное похолодание в сартанское время последнего оледенения. Проще говоря, индуктором видообразования микроба чумы был сухой и холодный климат Центральной Азии в конце ледниковой эпохи. Кроме



Монгольский сурок тарбаган и его зимовочная (постоянная) нора. Вверху: зимовочная пробка, состоящая из смеси мелкозема, щебня и цементирующих их экскрементов (1); гнездовая камера (2); отнорки-уборные, в которых в летние месяцы сурки накапливают строительную смесь (3). Внизу: слой мелкозема и щебня (а); и коренные породы (б), приведены температуры грунта и спящих сурков во время раскопки (февраль 1979 г.).

того, в возникновении чумного микроба важную роль играет физиология, точнее поведение монгольского сурка, связанное с устройством зимовочной пробки, а также особенности сурочьей блохи *O.silantiewi*.

В Центральной Азии, в горно-степных поселениях сурка тарбагана влажность почвы очень низкая, всего 2–7% [3], а грунт в зимовочной норе зверька сухой и щебнистый. Изготовить из него земляную пробку внутри норы, в вертикальном лазе диаметром 15–20 см, все равно, что замазать сухим песком отверстие в потолке размером с футбольный мяч. Из-за дефицита почвенной влаги у монгольского сурка выработалось специфичное поведение. При залегании в спячку он устраивает зимовочную пробку из специально подготавливаемой смеси мелкозема, щебня и влажных каловых масс, которые летом собираются в отнорках (уборных). Для перетаскивания камней, обвалынных в фекалиях, сурки используют зубы, при этом частицы фекалий, а с ними и возбудитель псевдотуберкулеза, попадают в ротовую полость. Итак, во рту спящих тарбаганов — экскременты, а в них — кишечный паразит, микроб псевдотуберкулеза!

Сурки — типичные семейно-колониальные животные. Группировки из 2–22 разновозрастных и разнополовых зверьков совместно зимуют в одной постоянной, или зимовочной, норе. У каждого зверька в течение зимней спячки более длительные периоды глубокого сна (торпора) чередуются с короткими периодами бодрствования (эутермии). В торпорной фазе температура тела снижается до 2–5°C, в эутермной может достигать нормальной, у активных сурков — около 37°C. За осенне-зимне-весеннее время сурки не вполне

синхронно просыпаются до 15 раз, примерно дважды в месяц. Таким образом, каждый зверек в течение периода подземной жизни имеет два гомеостатических состояния, между которыми лежит промежуток физиологической гетеротермии. Отсюда следствие: блохи в холодное время года питаются на сурках, температура тела которых лежит в диапазоне 5–37°C. Обратим внимание на непрерывность температур!

В 1970-х годах в тувинском очаге чумы, расположенном в Центральной Азии, мы изучали зимнюю спячку тарбагана. В феврале—марте, во время максимального зимнего промерзания грунта (до глубины более 2 м), раскопали три зимовочных норы. Из них изыали восемь глубоко спящих и девять проснувшихся активных зверьков, среди которых были молодые, полувзрослые и взрослые особи. Из их шерсти собрали 230 личинок *O.silantiewi*, 60 живых и 452 пустых коконов, а из ротовой полости торпидных зверьков — дополнительно 20 личинок. Пустые коконы (от 4 до 87) обнаружили также на 22 зверьках, отловленных в первые две недели после весеннего пробуждения.

Отметим распределение коконов на шерсти: большая часть прикреплена на голове, у основания хвоста и на наружной стороне задних ног. Все личинки, извлеченные из ротовой полости, оказались с кровью и увеличенными в размерах за счет развития жирового тела, что свидетельствовало о полноценности пищи и об их готовности к окукливанию. У спящих зверьков поврежденная личинками слизистая ротовой полости и язык обильно кровоточили, изо рта заметно выступала кровяная пена, а рот, зубы, лапы были обильно испачканы экскрементами (следами устройства зимовочной пробки осенью). Не зарубцевавшиеся раны в рото-



Тувинский природный очаг чумы, Монгун-Тайгинский мезоочаг. Снеговое покрытие в зимне-весенние месяцы не превышает 30—40%, грунт промерзает на глубину более 2 м к началу января, а оттаивает в июле.

вой полости мы наблюдали у всех сурков, отловленных после выхода из нор в конце марта и начале апреля, что говорит о массовости описываемого явления, его общепопуляционном характере.

Отсюда понятна причина концентрации пустых коконов на голове, хвосте и наружной стороне задних ног у спящих и недавно пробудившихся сурков тарбаганов. Зимой грунт промерзает глубже гнездовых камер, и личинки переходят из гнездовой выстилки на более теплые тела спящих зверьков. При этом некоторые личинки, произвольно перемещаясь в шерсти, попадают в ротовую полость сурка, где, питаясь на слизистой, травмируют ее. Перед окукливанием личинки покидают ротовую полость и прикрепляются к шерсти близ рта. Зная позу свернувшегося в шар спящего сурка, у которого нос уткнулся в анус, а задние ноги прижаты к щекам, легко предсказать места прикрепления коконов.

Подведем итог наших наблюдений. С осени в ротовую полость тарбаганов попадают экскременты и, соответственно, псевдотуберкулезный микроб. Слизистая ротовой полости, поврежденная зимой личинками блох, постоянно кровоточит из-за временной (торпорной) гемофилии. В ротовой полости происходит постоянное «зара-

жение крови» возбудителем псевдотуберкулеза. У сурка во время глубокого сна подавлена активность иммунной защиты; его «холодная» кровь, как органическая среда обитания псевдотуберкулезного микроба, уподобляется экскрементам. Есть убедительные основания полагать, что факультативная личиночная гематофагия специфических блох сурков зародилась относительно недавно, и характерна она для холодных и бесснежных районов Центральной Азии.

На основе новых эколого-географических, палеоклиматических и генетических данных можно сформулировать основные постулаты теории происхождения и мировой экспансии микроба чумы.

Предковая форма возбудителя чумы — микроб псевдотуберкулеза 1-го серотипа (*Y.pseudotuberculosis* O:1b), который доминирует в северо-центрально-азиатских и дальневосточных районах с суровым климатом.

Метаморфоза микроба псевдотуберкулеза в чумную бактерию произошла в конце позднего плейстоцена. За весь четвертичный период глубокое промерзание грунта (2 м и более) в Центральной Азии отмечено только в сартанское время позднего плейстоцена и в голоцене, т.е. не ранее 22 тыс. лет назад [10].



Участники паразитарной системы: блоха *Dipsosylla silantiewi* и монгольский сурок ([www.bbc.voc.com.cn](http://www.bbc.voc.com.cn)).

В ультраконтинентальном районе зимнего антициклона в Центральной Азии личинки блох, паразитирующие на монгольском сурке тарбагане, зимой переходят к факультативной гематофагии, что приводит к устойчивому контакту крови сурков с псевдотуберкулезным микробом [3].

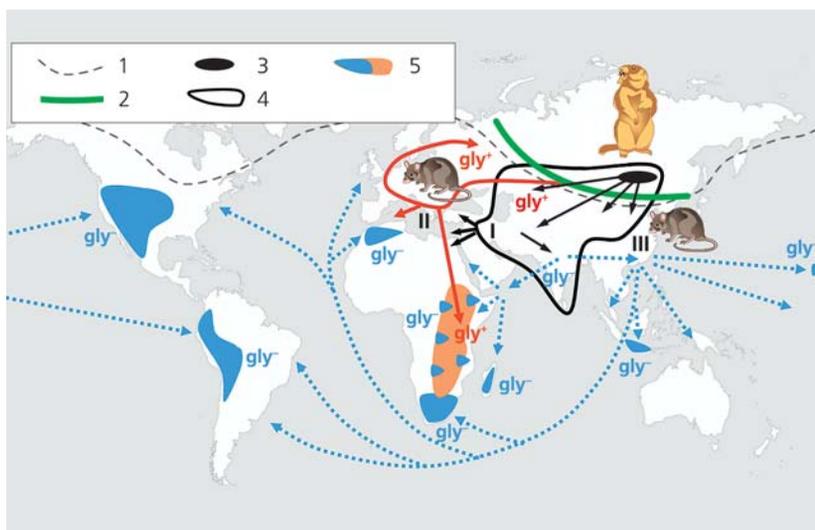
Теперь уже можно легко представить, как сапрозоонозный кишечный псевдотуберкулезный микроб постепенно эволюционировал в облигатный паразит крови незимоспящих грызунов: экскременты тарбагана → спящий сурок → активный сурок → незимоспящий грызун.

Знание молекулярногенетических, популяционных и биоценологических факторов, а также их многообразных связей позволяет выделить в эволюционной истории возбудителя чумы основные вехи.

I. Возбудитель чумы появился в паразитарной системе «монгольский сурок *M.sibirica* — блоха *O.silantiewi*» во время максимального четвертичного (сартанского) похолодания в позднем плейстоцене в Центральной Азии.

II. В голоцене чумной микроб естественным путем по принципу «масляного пятна» распространился в популяциях норковых грызунов и пищух на аридных пространствах Евразии.

III. Во время татаро-монгольской экспансии на запад, создавшей условия для второй пандемии, микроб «суркового» подвида (*antiqua*) вырвался за пределы естественного азиатского ареала, антропогенным путем распространился по Европе и проник на африканский континент, где образовал вторичные природные очаги в популяциях местных песчанок *Gerbillurus* и *Taterillus*.



Происхождение, естественное распространение в Евразии и антропогенная мировая экспансия микроба *Y.pestis* во время первой (I), второй (II) и третьей (III) пандемий. 1 — южная граница зоны многолетнемерзлых грунтов; 2 — граница доминантного распространения в природе микроба *Y.pseudotuberculosis* O:1b; 3 — ареал сурка-тарбагана, район происхождения микроба чумы; 4 — первичные природные очаги; 5 — вторичные природные очаги; gly<sup>+</sup> (gly<sup>-</sup>) — способность (неспособность) штаммов ферментировать глицерин.

IV. Во время третьей пандемии с корабельными крысами микроб уже другого подвида (*orientalis*) из Азии вновь проник в Африку и впервые на быстроходных морских судах добрался до Нового Света, где закрепился в виде вторичных природных очагов в популяциях земляных белок, луговых собачек, полевок, морских свинок.

Таким образом, в Евразии встречается множество подвидов микроба чумы [11], на африканском континенте — два подвида («сурковый» и «крысиный»), в Новом Свете — только один («крысиный»).

## В поисках согласия

Экологический сценарий происхождения, эволюции и мировой экспансии возбудителя чумы весьма заметно расходится с гипотезами, построенными на основе генетических данных. Где же истина? Какой из них достоин большего одобрения?

В пользу экологического сценария говорит следующее:

- знания об исходной и окончательной формах видообразования — от *Y.pseudotuberculosis* (O:1b) к *Y.pestis* (ssp. *tarbagani*);

- доступность наблюдений и изучения среды, в которой проходило видообразование, а именно — паразитарной системы «монгольский сурок — сурочья блоха *O.silantiewi*»;

- ретроспективный анализ позднелайстоценовых условий возникновения чумного микроба на основе палеонтологических, палеоклиматических и физико-географических данных;

- молекулярногенетические данные, находящие непротиворечивую интерпретацию в рамках предложенного сценария;

- надежная теоретическая база в виде современной эволюционной теории для анализа частных данных, касающихся происхождения микроба чумы.

Такие аргументы делают этот экологический сценарий наиболее правдоподобным в сравнении с другими, позволяют принять его за исходную гипотезу и наполнять его генетическими признаками. Биологическое содержание сценария, понятное широкому кругу исследователей, дает существенные гносеологические преимущества перед слишком редуцированными историческими реконструкциями. К примеру, некоторые авторы из-за сходства отдельных генетических признаков у кавказского подвида *Y.pestis caucasica* и псевдотуберкулезного микроба считают Кавказ родиной чумы и выстраивают соответствующую филограмму [11,12]. Но на Кавказе, в относительно теплом климатическом регионе, нет псевдотуберкулезного микроба 1-го серотипа или он встречается крайне редко! Истоки чумы следует искать в холодных, суровых краях — как в предложенном сценарии.

Несмотря на разительное несходство экологической и генетической филогений, между ними нет непреодолимой пропасти, более того, есть безусловные точки соприкосновения. Экологический сценарий для молекулярных и генетических признаков очерчивает диапазон генетической изменчивости микробной популяции, вступившей на путь видообразования, выделяет рамки экологической достоверности генетических фактов, привлекаемых для филогенетических выводов [3,13].

Как показывает экологический сценарий, успех молекулярной реконструкции истории чумного микроба придет с пониманием сущности трех тезисов: первый — микробы псевдотуберкулеза *Y.pseudotuberculosis* O:1b и чумы *Y.pestis tarbagani* имеют прямые родственные отношения, но не сходны (по клиническим проявлениям и показателям вирулентности и патогенности). Второй — микроб псевдотуберкулеза *Y.pseudotuberculosis* O:1b и микробы чумы «полевковых» и «пищуховых» подвидов *Y.pestis caucasica*, *altaica*, *bissarica*, *ulegeica*, *microtus* сходны по вирулентности и патогенности, отдельным биохимическим и генетическим признакам, но не имеют прямых родственных связей. Третий — за родством не всегда следует сходство, и, наоборот, из сходства не всегда следует родство; параллельная эволюция распространена широко, поэтому любые признаки для построения филогений (не только молекулярные) следует подбирать тщательно и крайне осторожно, опираясь на весь ранее накопленный всесторонний научный багаж.

Сейчас филогенетический анализ молекулярногенетических данных ориентирован на сценарии-гипотезы, отражающие два разных классификационных подхода. В западных научных школах филогению чумного микроба «примеряют» к внутривидовой классификации Девинья [14], в которой выделено три внутривидовых формы (биовара): древняя, или сурковая, — *antiqua*; средневекковая, или песчанковая, — *mediaevalis* и восточная, или крысиная, — *orientalis*. Недавно китайские исследователи добавили четвертую, полевковую, — биовар *microtus* [11]. Эта классификация, построенная на основе эпидемиологического критерия — гипотезы о трех последних пандемиях (хотя человек не имел ни прямого, ни косвенного отношения к происхождению возбудителя), считается устаревшей, однако пока молекулярные признаки соотносят именно с ней.

В России для анализа генетических данных используют классификацию, в основе которой лежит подразделение на «подвиды»: основной (сюда входят биовары *antiqua*, *mediaevalis*, *orientalis*) и дополнительные (кавказский, улегейский, гиссарский, алтайский и др.), циркулирующие в популяциях полевок и пищух в определенных географических регионах. Эта классификация столь же несовершенна, как и предыдущая. По генетиче-

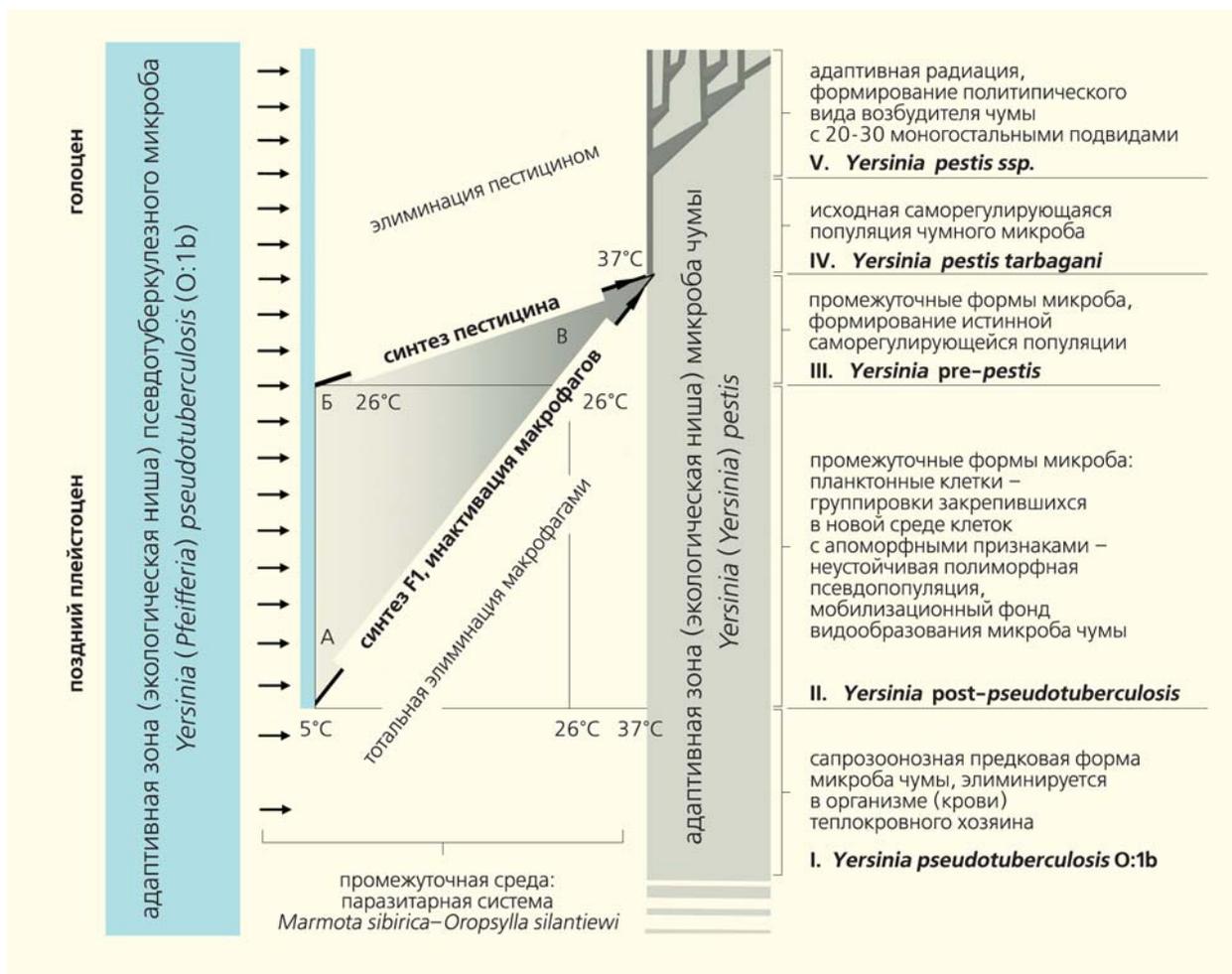


Схема филогенеза возбудителя чумы *Y.pestis* (видообразование, внутривидовая дифференциация), построенная на основе экологических признаков [13]. А, Б, В — область экологической достоверности генетических признаков, которые можно привлекать для интерпретации видообразования [3, 15]. Там происходили молекулярные преобразования: начальное «заякоривание» и размножение псевдотуберкулезного микроба в новой среде — лимфомиелоидном комплексе сурка тарбагана за счет преадаптаций и определенного сходства свойств мертвой внешней органики и «холодной» крови спящих сурков; транзит признаков предка (плезиоморфий) в новую производную форму; формирование новых, специфических для чумного микроба структур и функций (апоморфий); утеря некоторыми сохранившимися генами своих функций (инактивация); деградация ненужных в новых условиях структур и функций (делеции); встраивание (инсерции) и дубликация мобильных генов в микробных клетках. Все имеющиеся генетические данные об этих преобразованиях требуют глубокого адаптационного осмысления.

ским и классическим признакам она редуцирована (на самом деле внутривидовое разнообразие гораздо богаче); асимметрична (основной подвида распространен почти по всему миру, а дополнительные — точечно); не вполне логична (основной подвида объединяет две географически разобщенные формы с разным отношением к ферментации глицерина); терминологически неадекватна («полевковый» подвида представлен как исходный для филума *Y.pestis*, а именуют его дополнительным, несущественным; и почему-то в категории «полевковых» (группа *Pestoides*) оказались подвида *altaica* и *ulegeica*, характерные для двух соседствующих на Алтае и на западе Монголии

популяций монгольской пищухи (*Ochotona princei*). Однако в силу инертности систематиков-микробиологов классификация не сдана в архив и остается ориентиром в филогенетических построениях российских молекулярных генетиков.

Использование западными и российскими исследователями разных классификаций для анализа и «привязки» молекулярных признаков и реконструкции по ним филогенезов создает определенный методологический хаос: каждый думает, конструирует, убеждает и утверждает свои идеи сам по себе, едва лишь вдаваясь в полемику с оппонентами. Но естественная система — одна, и при разных методах исследований желателен

единый и надежный ориентир. Таким видится гостальный (host — хозяин) принцип классификации и придание подвиду *Y.pestis tarbagani* статуса исходного, первичного [3].

Интерпретация молекулярногенетических данных во многом зависит от решения проблемы родства и сходства, т.е. используемых для филогенетических реконструкций гомологичных признаков [15]. Их надо уметь надежно отличать от гомоплазий — параллелизмов, которые в биологическом мире распространены чрезвычайно широко. Пока не вполне ясно, всякая ли мутация, обнаруженная у двух любых организмов, унаследована от их общего предка. Надо полагать, далеко не всякая. Например, пока нельзя утверждать, что способность «полевковых» подвидов Rha+ и Mlb+ ферментировать рамнозу и мелибиозу унаследована от предкового псевдотуберкулезного микроба. Говорить иначе, «полевковые» ли подвиды — прямые наследники псевдотуберкулезного предка, т.е. самая древняя форма микроба чумы? Скорее всего,

это наиболее молодая полифилетическая группа подвидов, не имеющих между собой прямых родственных связей. При этом пока неясно функциональное значение используемых диагностических признаков. Прояснить такие затруднительные ситуации помогут факты-признаки, представляемые другими науками. В вопросах с «полевковыми» подвидами и очагами чумы много подсказок дает знание экологии и биогеографии представителей подсемейства Microtinae.

Сегодня описано множество генетических признаков микроба *Y.pestis*, среди которых, безусловно, найдутся и соответствующие экологическому сценарию. Нужно только их выявить, обосновать и «влести» в экологическую «канву». Появление единой версии, в которой будут сочетаться и однозначно толковаться все факты-признаки, относящиеся к разным структурным уровням организации живой материи, позволит понять происхождение воистину апокалиптического для человечества явления, именуемого чумой. ■

## Литература

1. Сунотницкий М.В., Сунотницкая Н.С. Очерки истории чумы. Кн.1–2. М., 2006.
2. Суицов В.В. и др. Структура и генезис эпизоотических систем «грызун — блоха — микроб *Yersinia pestis*» в ценозах Вьетнама, включая территории эковида // Окружающая среда и здоровье человека в загрязненных диоксинами регионах Вьетнама / Ред. В.С.Румак. М., 2011. С.202–258.
3. Суицов В.В., Суицова Н.И. Чума. Происхождение и эволюция эпизоотической системы (экологические, географические и социальные аспекты). М., 2006.
4. Wu Lien Tse et al. Plague: a manual for medical and public health workers. Shanghai, 1936.
5. Bercovier H. et al. Intra- and interspecies relatedness of *Yersinia pestis* by DNA hybridization and its relationship to *Yersinia pseudotuberculosis* // Curr. Microbiol. 1980. V.4. №4. P.225–229.
6. Achtman M. et al. *Yersinia pestis*, the cause of plague, is a recently emerged clone of *Yersinia pseudotuberculosis* // Proc Nat. Acad. Sci. (USA). 1999. V.96. №24. P.14043–14048.
7. Skurnik M. et al. Characterization of the O-antigen gene cluster of *Yersinia pseudotuberculosis* and the cryptic O-antigen gene cluster of *Yersinia pestis* shows that the plague bacillus is most closely related to and has evolved from *Y.pseudotuberculosis* serotype O:1b // Molec. Microbiol. 2000. V.37. №2. P.316–330.
8. Morelli G. et al. *Yersinia pestis* genome sequencing identifies patterns of global phylogenetic diversity // Nat. Genet. 2010. V.42 (12). P.1140–1143.
9. Вариабельность возбудителя чумы и проблемы его диагностики / Ред. Ю.М.Ломов. Ростов-на-Дону, 2009.
10. Owen L.A. et al. Relict permafrost structures in the Gobi of Mongolia: age and significance // J. Quaternary Sci. 1998. V.13. №6. P.539–547.
11. Li Y. et al. Genotyping and phylogenetic analysis of *Yersinia pestis* by MLVA: insights into the worldwide expansion of Central Asia plague foci // PLoS One. 2009. V.4(6): e6000.
12. Бобров А.Г., Филлинов А.А. Распространенность IS285 и IS100 в геномах *Yersinia pestis* и *Yersinia pseudotuberculosis* // Молекул. генет. 1997. Вып.2. С.36–40.
13. Суицов В.В. Происхождение возбудителя чумы — микроба *Yersinia pestis*: структура видообразовательного процесса // Изв. РАН. Сер. биол. 2012. №1. С.5–13.
14. Deynat R. Varieties de l'espece *Pasteurella pestis*. Nouvelle hypothese // Bull. WHO. 1951.V.4. №2. P.242–263.
15. Павлинов И.Я. «Новая филогенетика»: источники и составные части // Эволюционные факторы формирования разнообразия животного мира. Отв. ред. Э.И.Воробьева, Б.Р.Стриганова. М., 2005. С.15–29.

# Маныч: история древних проливов

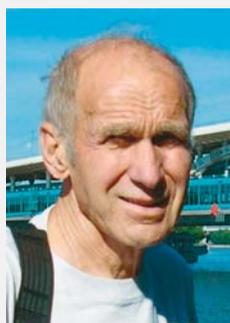
А.А.Свиточ

Между устьем Дона и западным Прикаспием расположена обширная низменность с долинами рек Восточного и Западного Манычей. Она протянулась на 400–500 км от Азовского до Каспийского моря. Здесь много водоемов — заболоченных речных проток и засоленных озер, крупнейшее из которых — Маныч-Гудило. Климат региона жаркий, осадков выпадает мало, а испарение крайне велико. Вся низменность занята сухими степями, на западе ковыльно-типчakovыми, юго-восточнее — пустынными полынно-злаковыми.

Первое упоминание о Маныче\* встречается в «Книге Большому Чертежу» (подробном географическом описании России примерно 1600 г.), где сказано, что р.Маныч вытекает из Хвалынского моря: «А ниже реки Юрюксала, 30 верст, пала в Дон против Роздоров Донецких, река Манача, протоку Маначи реки 520 верст; а река Манача вытекла от Хвалимского моря, от озера Ясыбаш за 70 верст, из горы Ташмурана, из солонцов» [1].

Маныч сыграл важную роль в палеогеографической истории

\* Под Манычем здесь, согласно определению К.Бэра, понимается субширотной ориентированная депрессия рельефа с речными системами Западного и Восточного Манычей, расположенная между Азовским (устьем Дона) и Каспийским морями.



**Александр Адамович Свиточ**, доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — биостратиграфия, палеогеография плейстоцена, геологическая история южных морей России.

южных морей России. В прошлые эпохи он неоднократно становился морским проливом, соединявшим Черное и Каспийское моря. Низменный характер депрессии (приуроченность к глубокому субширотному прогибу) и ее географическое положение издавна навели исследователей на мысль о существовании пролива. Впервые это предположил знаменитый естествоиспытатель академик



Космический снимок депрессии Маныча и сопредельных территорий.

<http://www.google.com/earth>

© Свиточ А.А., 2014

П.С.Паллас [2], путешествуя по югу России. В своем отчете он писал: «Рассматривая берега Сарпы, Маныча и других пространств до Крыма и Кавказа, мы можем принять их за берега древнего моря... узким каналом которого является Маныч, обтекая древний кряж Кавказа» [3]. Паллас установил, что р.Маныч состоит из двух потоков: западного и восточного. Позднее о возможности существования пролива говорил Бэр [4]. В 1856 г. он целенаправленно исследовал и описывал рельеф Манычской низменности, разыскивая следы соединения Азовского и Каспийского морей.

Первые основательные работы по геологическому изучению Маныча 90 лет спустя провел Н.Я.Данилевский [5]. Он фактологически доказал существование пролива, обнаружив в районе Мечеткинского лимана совместное залегание ископаемых черноморских и каспийских моллюсков.

В начале XX в. работы были продолжены В.В.Богачевым, К.И.Лисицыным и П.А.Православлевым. В середине века в связи с активным гидротехническим строительством на Маныче были выполнены обширные гидрогеологические изыскания, сопровождаемые бурением. Они позволили получить обильный фактический материал по геологии Манычской низменности, обобщенный Г.И.Горетским и Г.И.Поповым. В последние годы интерес к Манычу возрос. Многочисленные новые данные по его палеогеографической истории

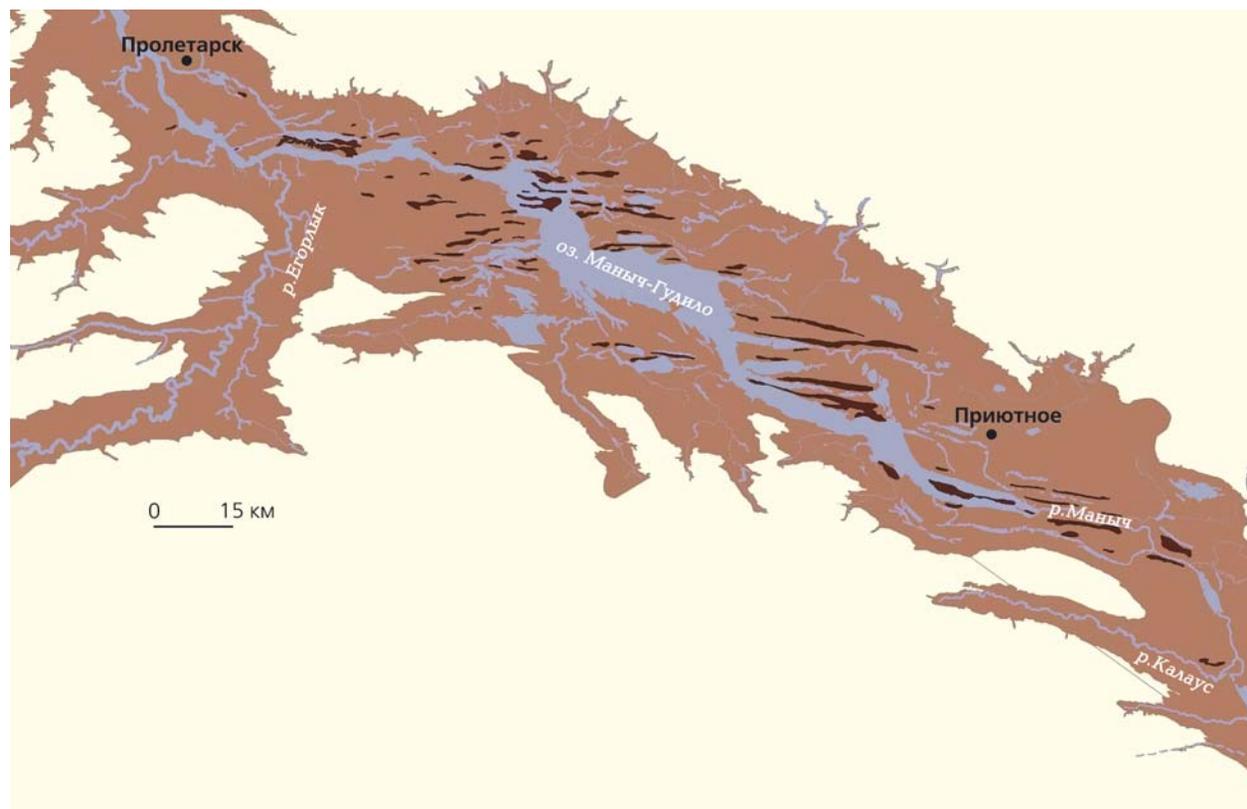
получены в недавних экспедициях сотрудников нашего факультета, Института географии РАН, а также Южного научного центра РАН.

## Рельеф Маныча

В геологическом отношении депрессия расположена в крупном Манычском прогибе, наложенном на глубокие разломы Скифской плиты. С юга он ограничен Ставропольским поднятием, а с севера — Сальско-Манычской грядой. Прогиб имеет асимметричное строение: его северный (ергенинский) борт крутой, а южный (ставропольский) — относительно пологий. Поперечными поднятиями — Сальским валом и структурой Зунда-Толга — Манычский прогиб разделен на крупные впадины: западную (Тузла-Манычскую), центральную (Маныч-Гудиловскую) и восточную (Восточно-Манычскую), заполненные разнообразными четвертичными отложениями.

Характерные элементы рельефа Маныча — вытянутые в широтном направлении гряды и разделяющие их понижения (так называемые палеоврезы).

*Гряды* сосредоточены в основном в обширной Маныч-Гудиловской впадине. Она расположена между устьями рек Егорлык и Калаус, имеет протяженность около 200 км и ширину более 50 км.



Гряды в центральной части Манычской депрессии (показаны темно-коричневым цветом).



Современные протоки Маныча.

Фото Н.Г.Новиковой

Особенно много гряд в ее западной части, непосредственно вокруг оз.Маныч-Гудило. Здесь они прослеживаются на двух уровнях: высоком буртасском (до 50 м отн. высоты) и низком хвалынском (менее 30 м). Средняя длина гряд 5–6 км, ширина — около 800–900 м, абсолютная высота изменяется от 18 до 52 м (в среднем 32–35 м), относительная — от 4 до 31 м.

Восточнее количество гряд уменьшается, они «вытягиваются» (до 25 км) и повторяют направление современных и древних рек и озерно-лиманских протоков. Еще восточнее, до устья р.Калауса, гряды единичны, а в верховьях р.Восточного Маныча уже отсутствуют.

Комплексное изучение Маныча, выполненное в последние годы [6], позволяет представить образование его грядового рельефа в виде последовательности конкретных событий.

В середине позднего плейстоцена (~50–40 тыс. лет назад) в Манычской низине существовало обширное буртасское озеро с мощной толщей донных отложений. Оно заполнялось водами рек юга Русской равнины и Северного Кавказа и имело сток в Черное море и Прикаспийскую низменность.

Во второй половине позднего плейстоцена, возможно, по причине резкого понижения уровня Черного моря и уменьшения речного стока, про-

изошла деградация водоема. Он разделился на систему сообщавшихся по протокам озер. Одновременно с их обмелением и сокращением в размерах углублялись и удлинялись протоки, разделенные грядами первичного рельефа. Буртасское озеро исчезло, а протоки были освоены и расширены новыми речными долинами.

В самом конце позднего плейстоцена, во время существования хвалынского пролива (речь о котором пойдет далее), образовавшиеся гряды подрабатывались эрозией и абразией.

В эпоху отступления хвалынского моря эрозия продолжилась с новой силой, что было связано с размывом ложа пролива и началом формирования современной речной сети.

Таким образом, образование грядового рельефа Маныча не было одноактным событием, но его основные черты возникли на заключительном этапе существования буртасского озера.

*Врезы (палеоврезы)* — формы рельефа, созданные эрозийными и абразионными процессами. В Манычской депрессии они многочисленны, разнообразны по морфологии, возрасту и происхождению.

Врезы разделяются на две большие группы: двусторонние, образованные преимущественно донной (глубинной) эрозией речных систем и проток древних проливов, и односторонние,



По берегам водоемов тянутся полосы солелюбивой растительности.

Фото Н.Г.Новиковой

подрезающие борта впадины и берега палеоводоемов (проток, эстуариев и заливов).

Древние врезы прослеживаются по всей толще плейстоцена Маныча. Наиболее крупные из них приурочены к нижним (ранний—средний плейстоцен) стратиграфическим горизонтам. Обычно это объясняют более продолжительным существованием древних проливов по сравнению с молодыми (поздний плейстоцен—голоцен), хотя не исключено, что древние проливы просто были более многоводными.

### Плейстоценовые проливы

Современные Черное и Каспийское моря представляют собой систему внутриконтинентальных водоемов — реликтов океана Восточного Паратетиса. В конце неогена он распался на несколько изолированных и полуизолированных водоемов, периодически сообщавшихся между собой по Манычской депрессии. Так, в настоящее время на Маныче достоверно установлены следы четырех плейстоценовых проливов: бакинского (позднечаудинского), раннехазарского (древнеэвксинского), позднехазарского (карангатского) и раннехвалынского. Их существование доказано нали-

чием в разрезе Маныча морских осадков с остатками черноморской и каспийской фауны.

**Бакинский (позднечаудинский) пролив.** Самая ранняя фактологически обоснованная связь между Черным морем и Каспием относится ко второй половине раннего плейстоцена. В это время, в период одной из крупнейших и самой продолжительной — бакинской — трансгрессии Каспия (уровень которой превысил порог у Зунда-Толга), происходил переток вод в позднечаудинский водоем Черного моря.

Пролив представлял собой крупную отрицательную форму рельефа, остатки которой, однако, совершенно не выражены в современном рельефе, а фиксируется только по материалам бурения. Протяженность пролива достигала примерно 500 км, ширина на входе и выходе составляла 10–15 км, в районе Маныч-Гудило, возможно, увеличивалась до 40 км (в среднем она оценивается в 20 км). На отдельных участках пролив, по видимому, представлял собой серию протоков.

Ложе сложено разнообразными палеоген-неогеновыми породами (глубина вреза в них составляет 10–30 м). Его поверхность неровная, деформированная положительными и отрицательными тектоническими движениями. Наибольшие поднятия и опускания приурочены к Сальскому валу,

поднятию Зунда-Толга и Маныч-Гудиловской впадине. Реконструированное недеформированное ложе слабо наклонено к западу.

Днище пролива заполнено не только морскими осадками бакинской трансгрессии Каспия, но и более молодыми отложениями, свидетельствующими о наследовании бакинских врезов водами более молодых проливов. Бакинские осадки разнообразны по литологическому составу. Их максимальная мощность установлена у Маныч-Гудило и достигает 45 м.

Во время этой односторонней связи между бакинским и позднечаудинским бассейнами с середины и до конца раннего плейстоцена по проливу проходила активная миграция каспийской фауны в Черное море. Об этом говорят находки в черноморских отложениях многочисленных представителей бакинских солоноватоводных моллюсков: *Didacna rudis*, *D. catillus*, *D. carditoides* и др. В отложениях пролива встречены и чаудинские *D. pseudocrassa*, указывающие на проникновение в пролив черноморских вод [7, 8]. Местами многочисленны раковины пресноводных моллюсков: *Dreissena polymorpha*, *Viviparus* sp., *Unio* sp. и др., свидетельствующие об опреснении вод пролива выпадающими в него реками. Перепад уровней между бассейнами в начале существования пролива, вероятно, превышал 40–50 м, а в дальнейшем, по мере заполнения водой котловины Черного моря, сократился до 30 м и менее.

**Раннехазарский (древнеэвксинский) пролив.** В первой половине среднего плейстоцена в черноморском регионе располагался древнеэвксинский водоем, а на месте современного Каспия — крупный раннехазарский, по размерам и положению уровня практически не уступавший бакинскому. Отложения раннехазарской трансгрессии широко развиты на всех побережьях моря, особенно в Северном Прикаспии, где они прослеживаются почти до Предсыртового уступа на севере и восточных склонов Ергеней на западе.

В депрессии Маныча между этими водоемами существовал широкий пролив. Он начал функционировать, когда уровень раннехазарской

трансгрессии превысил 40 м и преодолел порог у Зунда-Толга. Начался односторонний сброс каспийских вод в Черное море, уровень которого в то время располагался существенно ниже 0 м абс. высоты. В дальнейшем, после выработки профиля равновесия и заполнения вреза осадками, произошло выравнивание уровней сообщавшихся бассейнов.

Как и бакинский, этот пролив представлял собой крупную форму рельефа, ныне погребенную. Их конфигурация практически совпадала, лишь в центральной и западной частях раннехазарский пролив был на 5–10 км шире бакинского.

Днище пролива на входе располагается на отметках около –40 м абс. высоты и постепенно снижается к западу до –60 м. У восточного входа ширина ложа достигает 35 км, у поднятия Зунда-Толга она резко уменьшается до 2.5 км. На участках активных неоструктур (Сальского и Зунда-Толгинского поднятий и Манычско-Гудиловской впадины) отмечаются деформации днища. Неровный рельеф его ложа отмечается и западнее, в районе устья р. Калауса, где ширина пролива составляет всего 15 км. На остальном протяжении днище плоское, средней шириной 25–30 км, максимальной — до 40 км и более. Местами, особенно в западной части, пролив разделялся на несколько протоков. Недеформированное ложе располагалось на отметках от –30 м абс. высоты на входе в пролив и до –50 м на выходе, а уклон дна был практически таким же, как у бакинского пролива.

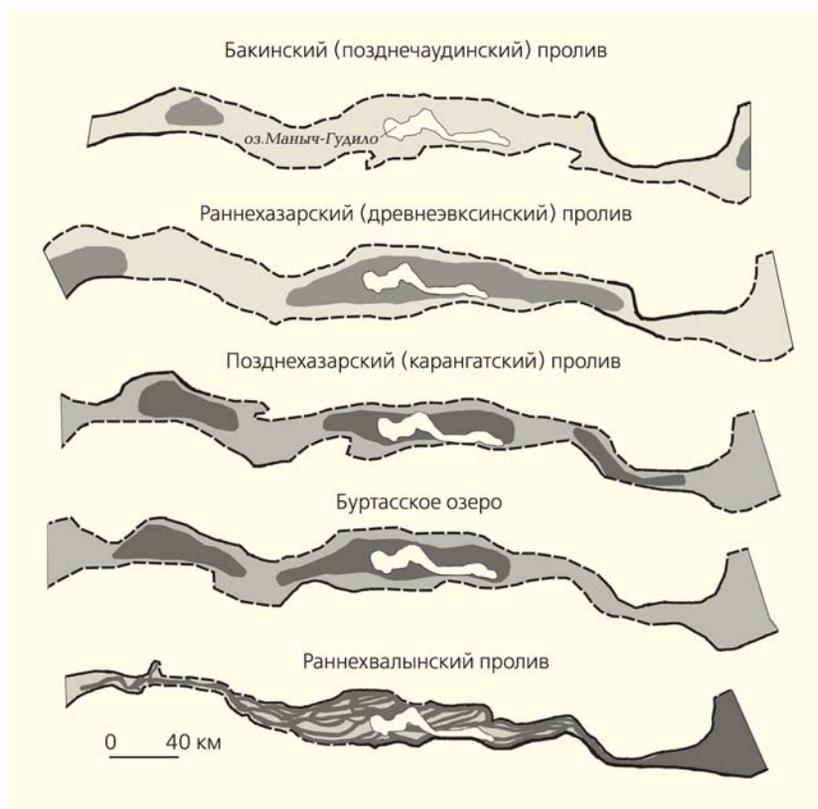
Борта пролива хорошо выражены в погребенном рельефе. Они относительно крутые, высотой до 20–30, реже до 40 м.

Ложе пролива заполнено осадками раннехазарской трансгрессии Каспия (их средняя мощность 10–20 м, максимальная — до 40 м), содержащими многочисленные остатки солоноватоводных и пресноводных моллюсков. Их анализ позволил установить, что в то время со стороны древнеэвксинского моря глубоко к востоку протягивался опресненный эстуарий, заселенный дидакнами черноморского и каспийского происхождения, а также множеством пресноводных видов. Но уже

Таблица

## Некоторые морфологические показатели плейстоценовых проливов Маныча [6]

Пролив	Время	Уклон ложа	Средняя ширина, км	Максимальный врез, м	Мощность отложений, м	Абсолютная высота, м		Деформация ложа, м
						подошвы	кровли	
Раннехвалынский	конец позднего плейстоцена	0.00008	10	20	20	0– –10	0–+40	10
Позднехазарский (карангатский)	начало позднего плейстоцена	0.00006	20	25–30	25	–5– –30	+10– –20	25
Раннехазарский (древнеэвксинский)	середина среднего плейстоцена	0.00004	25–30	70	40	–40– –60	+20– –40	20
Бакинский (позднечаудинский)	конец раннего плейстоцена	0.00006	20	30	45	–15– –50	–15– –40	60



Морфология манычских проливов и буртасского озера. Сплошной линией обозначены установленные границы проливов, пунктирной — предполагаемые, темным цветом показаны наиболее глубокие участки и крупные протоки.

в районе Маныч-Гудило и восточнее влияние черноморских вод в древнем проливе не прослеживается. Здесь в отложениях, заполняющих глубокий эрозионный врез, содержится исключительно каспийская малакофауна с руководящими формами *Didacna subpyramidata*, *D.nalivkini* и др.

Благодаря большому сбросу по Манычу раннехазарских вод в древнеэвксинский бассейн произошло смешение солевого состава Черного и Каспийского морей: это были солоноватоводные водоемы, в которых могли свободно существовать дидакны. В раннехазарском море обитала исключительно каспийская фауна, а в древнеэвксинском — смешанная из черноморских эндемиков (*D.pontocaspia* и др.) и каспийских мигрантов (*D.nalivkini*, *D.subpyramidata*, *D.pallasi* и др.).

**Позднехазарский (карангатский) пролив.** Карангатская трансгрессия — наиболее яркое палеогеографическое событие в плейстоценовой истории Черного моря. Это был крупнейший морской водоем площадью более 4,5 млн км<sup>2</sup> и высотой уровня до 5 м. На месте Каспия в это время существовало относительно небольшое солоноватоводное позднехазарское море, абсолютная высота уровня которого составляла около 10 м. История Маныча, соединившего эти два бассейна, сложна и весьма запутанна.

По своей конфигурации и протяженности пролив совпадал с предшествующими, лишь несколько уступая им по площади. Ширина пролива на входе составляла около 4 км, в районе Маныч-Гудило достигала 25—30 км, западнее сокращалась до 15 км, а на выходе в карангатское море вновь возрастала до 25 км.

Ложе пролива было относительно пологим и лишь на входе и выходе неровным, с глубокими эрозионными врезами. На входе днище располагалось на отметке около -5 м, а на выходе — около -30 м. Изначально недеформированные уклоны днища, вероятно, были крайне небольшими. Последующими тектоническими подвижками профиль ложа значительно исказился. Теперь ложе находится на отметках от +10 до -30 м абс. высоты, а кровля морских карангатских и верхнехазарских отложений — на отметках от +10 до -20 м. Как и для более древних проливов, наибольшие деформации днища отмечаются на участках Сальского и Зунда-Толгинского поднятий.

Отложения этого времени имеют трехслойное строение. Следовательно, стоит предположить, что в развитии пролива прослеживается определенная стадийность.

Сначала (в конце среднего — начале позднего плейстоцена) на Маныче располагался залив позднехазарского водоема, почти достигавший современного Азовского моря. Об этом свидетельствуют находки в низовьях Западного Маныча раковин позднехазарских моллюсков *D.surachanica* [7]. Первая стадия была непродолжительной, что, видимо, связано с кратковременностью существования относительно высокого (+10 м) уровня позднехазарского моря.

В дальнейшем, по мере развития карангатской трансгрессии, теплые и соленые черноморские воды заполнили Азовское море и протяженный эстуарий Западного Маныча и полностью вытеснили из них каспийскую фауну. Не исключено, что проникновение по депрессии морских черноморских вод происходило и далее на восток, вплоть до Западного Прикаспия, в осадках которого отмечались находки *Cerastoderma glaucum* [7].

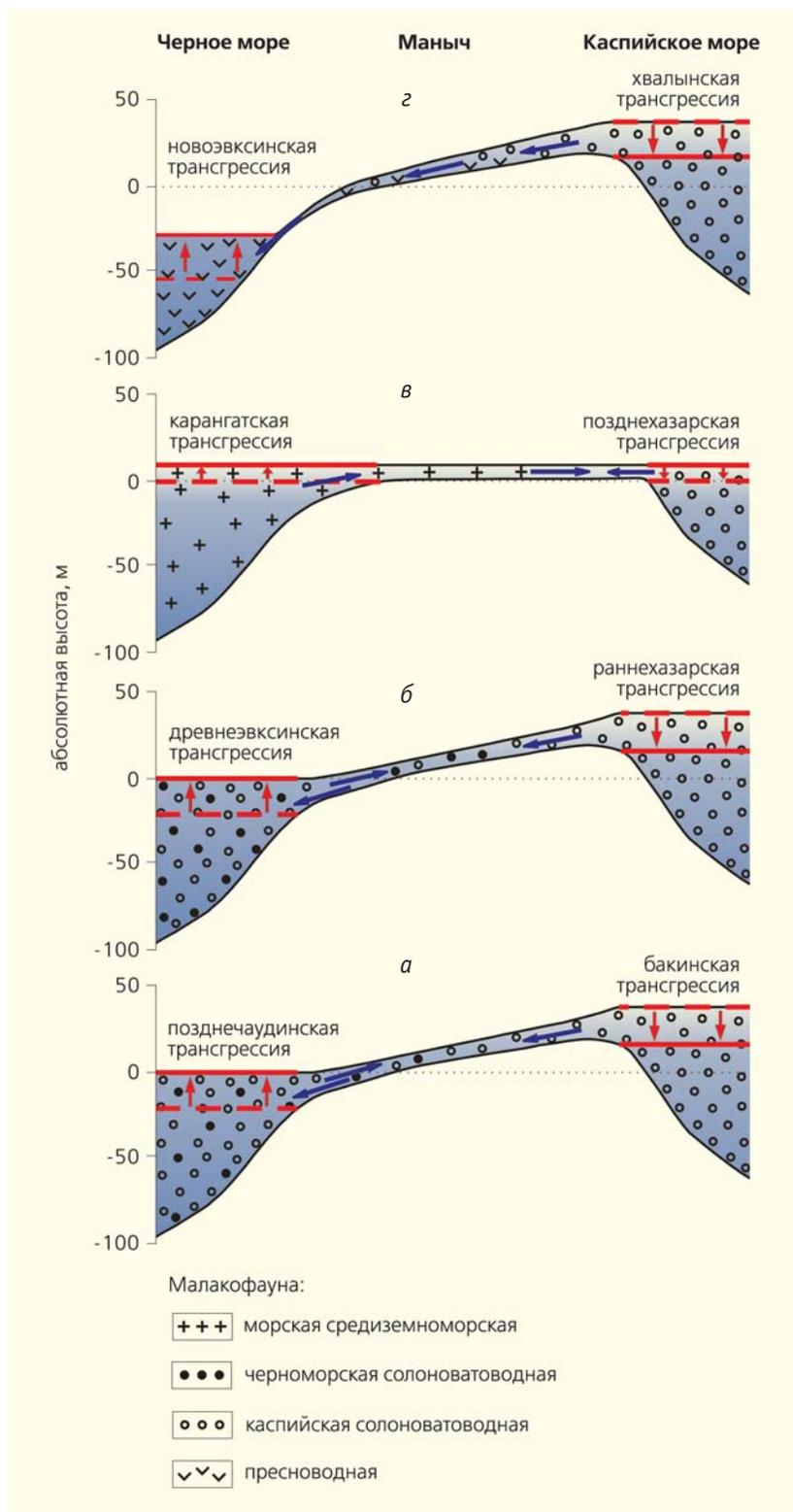
В заключительную (третью) стадию развития пролива в отложениях вновь господствуют представители каспийской фауны (*D.cristata* и др.). Это свидетельствует о новом обильном поступле-

нии каспийских вод в Манычско-Каспийскую депрессию.

**Буртасское озеро.** В середине позднего плейстоцена, после регрессии карангатского и позднехазарского бассейнов, в Манычской депрессии сохранился обширный пресноводный водоем, который Г.И.Горецкий назвал буртасским озером [9]. Его существование — это особая страница истории Маныча. Озеро занимало почти всю низменную часть впадины, заполняя ложбины древних проливов, и сбрасывало свои воды на восток и на запад. По сравнению с предшествующим позднехазарским (карангатским) проливом озеро имело большую площадь и глубину. На западном выходе его ширина превышала 15 км, в центральной части составляла 28 км (местами, возможно, до 40 км), а восточнее, у Зунда-Толга, снижалась до 5 км. Средняя ширина озера оценивается примерно в 25 км. Буртасские отложения, в отличие от более древних осадков, выходят на дневную поверхность и образуют гряды в центральной части депрессии. Судя по мощности осадков, местами превышающей 35 м, озеро было глубоким. В его центральной части абсолютные отметки высоты дна составляли -10 м и ниже.

Несмотря на внушительные размеры и продолжительную эпоху существования (десяtkи тысяч лет), озеро не оказало заметного влияния на историю Каспийского и Черного морей. В Прикаспии в это время продолжалось интенсивное накопление ательских лессовидных, преимущественно субэаральных (наземных), отложений с серией погребенных почв. В черноморском регионе продолжалось падение уровня карангатского бассейна, днище Азовского моря было осушено.

**Раннехвалынский пролив.** Хвалынская трансгрессия — четвертое (и последнее) крупное повышение уровня Каспия, случившееся во второй половине позднего плейстоце-



Схемы бассейнов Черного и Каспийского морей в разные эпохи существования проливов: позднечаудинскую—бакинскую (а), древнеэвксинскую—раннехазарскую (б), карангатскую—позднехазарскую (в) и новозэвксинскую—раннехвалынскую (г). Синими стрелками показано направление стока по проливу, красными — колебание уровня после открытия пролива. Красной пунктирной линией отмечено положение уровня моря в начале эпохи, сплошной — в ее конце.



Волга в нижнем течении. Такой облик, вероятно, имели протоки раннехвалынского пролива.

www.panoramio.com

на. Море затопило весь Северный Прикаспий, проникнув далеко на север по эстуариям рек Волги и Урала. В максимум трансгрессии его уровень достигал 50 м абс. высоты (превышая современный почти на 80 м), а площадь бассейна составляла около 950 тыс. км<sup>2</sup>. Береговые линии и террасы хвалынского моря хорошо сохранились и явно выражены в современном рельефе Прикаспия и Маныча. Осадки трансгрессии залегают с поверхности на обширных пространствах каспийских побережий.

Как и в предыдущих случаях, резкий подъем уровня Каспия привел к перетоку его вод в черноморскую котловину. По данным радиоуглеродного датирования, поступление хвалынских вод в Черное море продолжалось около 5 тыс. лет [6].

Морфологией и длительностью существования раннехвалынский пролив заметно отличался от более древних. По площади он был наименьшим и наследовал наиболее низкие участки — протоки буртасского озера. Его максимальная ширина отмечалась в центральной части (в районе Маныч-Гудило), где составляла 20 км и более, а восточнее и западнее не превышала нескольких километров. В основном пролив представлял собой систему протоков, сходную с современной Волгой в ее нижнем течении, причем наибольшее дробление отмечалось на участках развития гряд. Протоки, разделявшие их, достигали сотен метров в ширину и имели протяженность до 10 км.

Ложе пролива вложено в частично размытые карангатские и буртасские отложения. Глубина вреза на большей части пролива составляет 10–15 м, а на входе и выходе из него — до 20 м и более. У входа ложе располагается на отметках около 0 м абс. высоты, а на выходе — около –10 м. В рельефе отмечаются деформации (до 10 м и более), обусловленные новейшей тектоникой впадины. В современном рельефе ложе раннехвалынского пролива занято долинами Западного и Восточного Манычей и межгрядовыми ложбинами.

В начале поступления хвалынских вод по проливу в черноморскую котловину здесь располагался регрессивный сильно опресненный (или даже пресноводный) бассейн с уровнем ниже –60 м, заселенный пресноводной и азово-каспийской фауной. Водоем был бессточным (либо с периодическим сбросом пресных вод через Босфор) и существовал за счет континентального стока. Керченский пролив и Азовское море были осушены, на их месте существовала система пресных и засоленных озер, а также крупных протоков, по которым происходил сброс хвалынских вод в черноморскую котловину. Это привело к небольшой новозвксинской трансгрессии, во время которой была затоплена средняя часть черноморского шельфа (уровень моря поднялся примерно на 30 м), произошло слабое осолонение водоема (на 4–5‰) и распространилась малакофауна азовского типа (*Monodacna caspia*, *Adacna vitrea*,

*Dreissena polymorpha* и др.). Каспийские дидакны в Черное море не проникали — вероятнее всего, из-за сильного опреснения вод пролива речным стоком.

Анализ найденных в осадках раннехвалынского пролива раковин моллюсков указывает на существенное изменение солёности его вод. На востоке пролива и в его центральной части в отложениях многочисленных раковины относительно солёнолюбивых *D.protracta* свидетельствуют о солёности примерно 12—13‰. Западнее *D.protracta* исчезают, и среди дидакн остаются только формы, выдерживающие значительное опреснение (до 7‰).

\* \* \*

Маньчские проливы сыграли значительную роль в палеогеографической истории Черного и Каспийского морей. Безусловно, они имели много общего. Все располагались в самой низкой части Маньчской впадины и протягивались с восток-юго-востока на запад-северо-запад на 480—500 км. Уклоны их дна были практически такими же, как у современных крупных рек Русской равнины.

Более молодые проливы чаще всего наследовали морфологию древних. Но до наших дней сохранились следы лишь последнего пролива и буртасского озера — в виде грядового рельефа и хвалынской террасы в восточной части Маньча.

Возникновение проливов всегда было вызвано подъемом уровня Каспия и определялось высотой порога у Зунда-Толга и Сальского вала.

Следствием обильного каспийского стока в черноморские водоемы стали существенное изменение уровней обоих морей, смена солёности

вод и миграция фауны. После открытия проливов уровень Каспийского моря обычно существенно (на 5—25 м) падал. В черноморском регионе оно приводило к подъему вод регрессивных бассейнов до первых абсолютных положительных отметок. Котловина заполнялась водами с соевым составом каспийского типа (бедными натрием и хлором и обогащенными кальцием и сульфатами).

До настоящего времени не установлено сколько-нибудь заметного проникновения по Маньчу черноморских вод в Каспий. Миграция фауны моллюсков была односторонней: из Каспийского в Черное море. Проникновение средиземноморской и черноморской солоноватоводной фауны на восток ограничивалось только водами пролива, где она смешивалась с каспийскими пришельцами.

В плейстоценовой истории Маньча остается множество нерешенных вопросов. До сих пор существует дефицит документального материала — главным образом буровых данных (особенно по началу раннего плейстоцена). Малочисленные достоверные сведения по палеогеографической истории «сухопутного» Маньча. Много вопросов остается по миграциям каспийской фауны в Черное море и особенно по возможности проникновения черноморской фауны в Каспий. Внимание к ним, несомненно, поможет раскрытию интересной и загадочной истории этого низменного перешейка между крупнейшими южными морями России. В связи с планами предстоящего гидростроительства Маньч вновь привлекает внимание, а значит, мы еще многое сможем узнать, продолжая наши исследования. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 13-05-00086.**

## Литература

1. Книга Большому чертежу. М.; Л., 1950.
2. Паллас П.С. Путешествия по разным провинциям Российского государства. Ч.3. СПб., 1788.
3. Маракуев В.Н. Петр Симон Паллас, его жизнь, ученые труды и путешествия. М., 1877.
4. Бэр К.М. Ученые записки о Каспийском море и его окрестностях // Записки Императорского Русского географического об-ва. Кн. XI. СПб., 1856.
5. Извлечение из письма Н.Я. Данилевского о результатах поездки его на Маньч // Записки Императорского Русского географического об-ва. 1869. Т.2. С.139—180.
6. Свиточ А.А., Янина Т.А., Новикова Н.Г. и др. Плейстоцен Маньча (вопросы строения и развития). М., 2010.
7. Попов Г.И. Плейстоцен Черноморско-Каспийских проливов. М., 1983.
8. Янина Т.А. Дидакны Понто-Каспия. Смоленск; М., 2005.
9. Горецкий Г.И. О палеогеографии Приазовья и Западного Приманьчья в узунларо-гирканский и буртасский века // Вопросы географии. 1953. №33. С.190—221.

# Мифы как отражение жизни соляных недр Мертвого моря

Г.А.Беленицкая

*На свете очевидны территории,  
Охваченные внутренним горением,  
Где плавное течение истории  
Сменяется вдруг диким завихрением.*

И.Губерман

Предыдущие статьи из цикла «Мертвое море: соли, рассолы, мифы» посвящены строению и происхождению соленосных недр этого моря-озера, а также разнообразным проявлениям их жизни [1–3]. В них показано, что грабеновую структуру Мертвого моря можно рассматривать как длительно действующий очаг рассольно-соляной разгрузки, определяющую роль в жизни которого играли (и играют поныне) восходящие погребенные углеводородно-рассольно-соляные массы. Регулятором интенсивности их разгрузки неизменно служила (и служит) тектоническая и флюидодинамическая активность. Она влияет на разнообразные проявления жизни Мертвого моря, на современные и бывшие колебания уровня рассолов, в том числе на его катастрофическое снижение в наши дни. Эти выводы позволяют несколько иначе взглянуть и на другую, давностью около 4 тыс. лет катастрофу, связанную со знаменитым библейским сюжетом — гибелью городов Содомы и Гоморры. В последней статье цикла попробуем оценить вероятную геологическую природу и степень реальности осуществления этого драматического события с учетом рассмотренных ранее геологических, и прежде всего соляных особенностей места его действия.



**Галина Александровна Беленицкая**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского геологического института им.А.П.Карпинского (Санкт-Петербург). Область научных интересов — геология осадочных бассейнов и соляных формаций; флюидно-осадочные процессы и их роль в формировании осадочных пород и руд.

## Геологическая интерпретация и сценарий содомских событий

Среди разнообразных наименований Мертвого моря упоминается и название Содомское (или море Лота), обязанное широко известному библейскому сюжету, многократно освещенному исследователями разных эпох. Вспомним лишь его ключевые моменты.

Содом и Гоморра — древние города в районе Мертвого моря, население которых отличалось крайней распущенностью нравов, развратом и жестокостью к иноземцам. В наказание Бог разрушил эти города (точнее, пятиградие Содомское), предварительно послал ангелов к благочестивому Лоту, племяннику Авраама, с приказом бежать, не оглядываясь на то, что происходит с городами. А происходило вот что: с небес полились огонь, сера, соль. «Истечения от пожара лютого серою и солью... могли совершенно умертвить, а потом земля и воздух, также серой и солью напитанные, довершить окаменение» [4] (рис.1). В серно-соляной столп превратилась и жена Лота, которая оглянулась вопреки запрету. А процветавшие плодородные «благословенные» земли долины Сиддим, где располагались нечестивые города, были засыпаны серой и солью и залиты рассолами.

К этой библейской легенде обращались ученые всех времен, в наибольшей мере — теологи, историки, востоковеды, географы, археологи и, конечно, геологи [5–10]. Адекватного геологического истолкования требуют по крайней мере три события, сопряженные во времени и пространстве с Содомской катастрофой: масштабный взрывной выброс горючих газов с высоким содержанием соединений серы; поднятие уровня рассолов и быстрое покрытие ими при-



брежной полосы; резкое изменение ландшафтной обстановки в прилежащих областях.

Среди вероятных природных сил, способных вызвать такие явления, чаще всего обсуждаются вулканические (магматогенные) извержения [8, 9] и землетрясения [4–6, 10]. Обе трактовки геологически оправданы. Однако каждая из них имеет ограничения. Так, собственно вулканическая гипотеза лимитируется отсутствием в данном регионе в последние 4 тыс. лет прямых вещественных свидетельств вулканической активности (излияний лав, выбросов пепла и др.). Принятию же чисто сейсмической (авулканогенной) гипотезы мешает отсутствие среди обычных следствий землетрясений мощных огненных взрывов, сопутствующих Содомской катастрофе. В последние годы выдвинута еще одна версия — грязевой вулканизм, инициированный сеймотектонической активностью [7, с.112–114]. Ее поддерживает и Я.Э.Юдовия [11]. По заключению А.Гилата, события, «производящие взрывы, серную вонь, газовые пожары и провалы большой территории», могли стать следствиями грязевулканических извержений, аналогичных происходившим в плиоцене к западу от Мертвого моря и сформировавших грязевулканический комплекс Хатрурим.

Действительно, многие эффекты грязевого вулканизма сопоставимы с главными геологическими проявлениями Содомской катастрофы. Следует, однако, ввести уточнения.

Природные взрывные выбросы смесей рапы и дробленной соли в сочетании с углеводородами



Рис.1. Содомская катастрофа. «И пролил Господь на Содом и Гоморру дождем серу и огонь». Уничтожение Содома и Гоморры, Джон Мартин 1852 г. Жена Лотова не послушалась, оглянулась и стала соляным столпом.

*И сделалось тело прозрачною солью,  
И быстрые ноги к земле приросли.*

А.Ахматова. Лотова жена

(горючими газами и нефтью), сероводородом и серой можно назвать соляным вулканизмом (или галовулканизмом), представляющим собой своеобразную разновидность «осадочного» (амагматического) вулканизма [12]. В солянокупольных структурах «зоны, насыщенные высоконапорными газами и рапой... являются нестабильными: в них происходят катастрофические внезапные

выбросы дробленной соли и газа... Эти нестабильные зоны в соли приурочены к местам наибольших напряжений в растущем соляном штоке, где флюиды — газ и рапа, заключенные в соли, находятся в состоянии динамического режима под давлением до 1000 атм.» [13, с.102]. Подобные природным гидроразрывам взрывные выбросы меж- и подсолевой рапы, обломков соляных и других пород, углеводородов и сероводорода неоднократно наблюдались в солянокупольных областях, особенно часто — при бурении скважин [14, 15].

Это явление сходно с грязевым вулканизмом, но его главный породный участник — соляные массы, а не песчано-глиняные. Среди сопутствующих же компонентов присутствуют высококонцентрированные рассолы, сероводород и самородная сера. Кроме того, если грязевой вулканизм на глубине часто связан с глиняными диапирами, то галовулканизм — с соляными. Проявление той

или иной разновидности осадочного вулканизма (соляного или грязевого) определяется типом осадочного субстрата. В условиях почти чисто соляного разреза Мертвого моря, несомненно, более вероятен соляной вулканизм. Именно его правомерно считать возможным центральным звеном содомских событий.

Прокомментирую немного подробнее эту учитывающую соляную специфику региона версию гибели древних городов и попробую оценить соответствие ей трех главных геологических проявлений Содо́мской катастрофы (рис.2).

**Первое**, наиболее эффективное, — взрывной выброс, сопровождаемый пламенем, оседанием сажи, серы (в том числе ее крупных кусков), — вполне отвечает залповой разгрузке рассолов, дробленной соли, углеводородных и сероводородсодержащих газов, серы, нефти и др. Следствия реализации подобных (пусть и не столь масштабных) взрывных

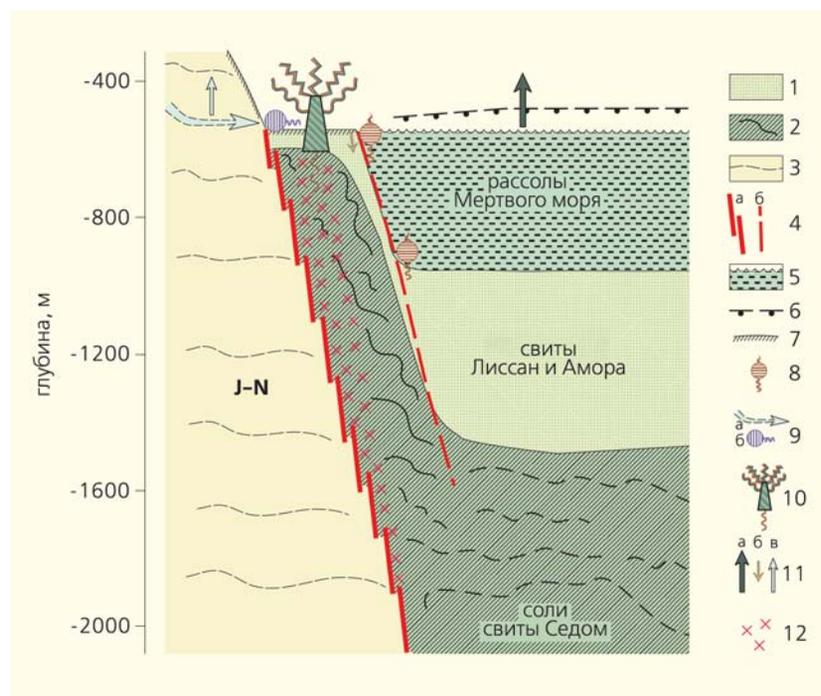


Рис.2. Геологическая модель содомского события. Составила Беленицкая. 1 — озерные отложения свит Амора и Лисан ( $Q_{2-3}$ ); 2 — каменная соль свиты Седом ( $N_2-Q_1$ ); 3 — мезозойские осадочные комплексы обрамления грабена Мертвого моря; 4 — тектонические нарушения: ограничивающие грабен (а) и внутриграбеновые (б); 5—9 — ситуация на время, предшествующее содомскому событию: 5 — уровень высококонцентрированных рассолов Мертвого моря, 6 — положение напорного уровня глубинных рассолов, 7 — поверхность Земли, 8 — очаги разгрузки восходящих глубинных рассолов с углеводородами и сероводородом, 9 — потоки нисходящих инфильтрационных слабосоленых и пресных вод (а) и очаги их разгрузки (б); 10, 11 — геологические проявления содомского события: 10 — углеводородно-рассольно-соляное извержение (галовулканизм), 11 — резкое повышение уровня рассолов Мертвого моря и напорного уровня глубинных рассолов (а), просадки поверхности прибрежной суши (б), повышение уровня разгрузки нисходящих инфильтрационных вод (в); 12 — зоны развития гидроразрывов, трещиноватости, повышенной проводимости.

разгрузок в структуре Мертвого моря хорошо известны [2]. Основные источники «содомских» выбросов на глубине вероятнее всего связаны с участками соленосных комплексов, нарушенными гидроразрывами, а возможно, и с подсолевыми отложениями, выполняющими зоны тектонических ограничений — наиболее погруженных частей грабеновой структуры. Это и определило их состав, в том числе участие углеводородов и сероводорода. Эффекты от совместных выбросов такой чрезвычайно горячей смеси в кислородную среду атмосферы хорошо известны. Такие выбросы неоднократно становились главной причиной огненных взрывов и пожаров. Наиболее вероятным спусковым механизмом мог служить скачок флюидодинамических напоров в результате изменения поля тектонических напряжений — его интенсивности, а возможно, и преобладающего знака. Показательна повсеместно наблюдаемая связь внезапных природных (а также и техногенных) выбросов рассолов и газов с областями современных контрастных тектонических и галокинетических движений [13, 14]. Там в условиях аномальных флюидодинамических напряжений возникают предпосылки для их разрядки — образуются потенциально «выбросные» зоны. Тектонические ограничения грабеновой струк-

туры Мертвого моря и области их влияния — безусловно, именно такие магистральные зоны повышенной напряженности и наибольшей взрывоопасности.

Спонтанные воспламенения и пожары происходят в регионе и ныне.

**Второе** проявление Содомской катастрофы — погружение под уровень рассолов наиболее низких прибрежных областей — могло быть вызвано резким подъемом уровня рассольного водоема и напорного уровня глубинных рассолов с одновременными обрушениями, провалами, проседаниями поверхности солей.

На кривой вероятных колебаний уровня Мертвого моря во времени [3, рис.6,а] отчетливо выделяется «катастрофический» интервал (как раз около 4 тыс. лет назад), когда начался резкий значительный подъем, сменивший максимально низкое положение уровня (–500 — –550 м, т.е. более чем на 100 м ниже современного) (рис.3). Вызвать такого рода событие могли градиентные изменения в полях напряжений, что вообще весьма характерно для рассматриваемой активной тектонической структуры, особенно в «катастрофический» интервал времени [8].

Эти же причины могли вызвать и **третье** проявление Содомской катастрофы — резкое изменение ландшафтной обстановки в прибрежной, но не залитой рассолами зоне. Предполагаемое низкое (до события) положение уровня рассолов Мертвого моря (местного базиса дренирования и эрозии) должно было привести к глубокому дренированию обрамлений исходно пресными инфильтрационными водами. Это могло вызвать, с одной стороны, возникновение карстовых систем (в соляных породах), а с другой — образование на побережьях высокодебитных нисходящих источников, в том числе (при дренировании несоляных пород) и относительно пресных, вблизи которых формировались цветущие оазисы. Последовавшее за этим повышение базиса дренирования (при резком подъеме уровня моря и усилении восходящих глубинных разгрузок высококонцентрированных рассолов) привело к снижению интенсивности стока инфильтрационных вод. Все это лишило прибрежные земли источников пресной воды и привело к быстрому засолению.

Таким образом, смену цветущих оазисов мертвой пустыней могли вызвать не только катастрофические пожары, но и интенсивное засоление прибрежных земель в результате снижения роли

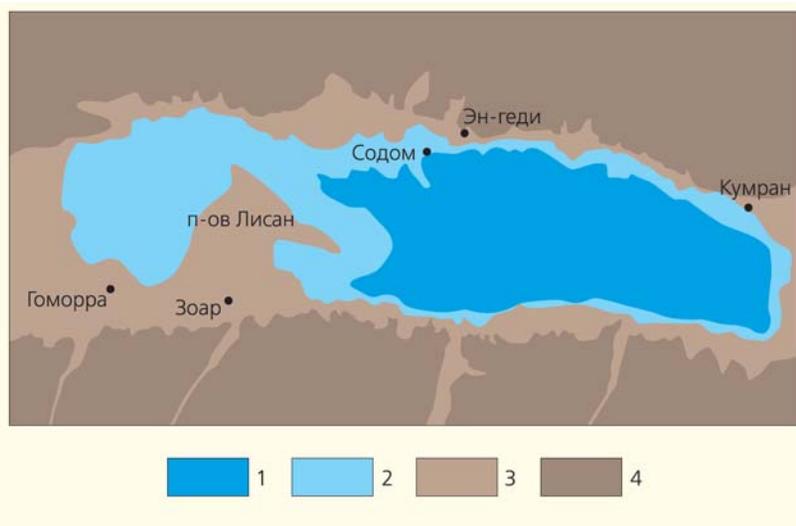


Рис.3. Предполагаемые контуры Мертвого моря во 2-м тысячелетии до н.э. и положение древних городов Содома и Гоморры [10]. 1 — глубоководная палеовпадина Мертвого моря, 2 — палеосуша (в пределах мелководной акватории XX в.), 3 — прибрежная (вне акватории XX в.) суша, 4 — горная суша.

относительно пресных инфильтрационных вод и одновременного усиления разгрузки восходящих высококонцентрированных рассолов.

В итоге мы видим, что все три группы геологических проявлений Содомской катастрофы представляют собой вполне закономерные проявления жизни Мертвого моря как активной тектонической и галокинетической структуры и как пульсирующего очага углеводородно-рассольно-соляной разгрузки. Такая жизнь моря-озера типична и для геологического прошлого, и для исторического времени, и для наших дней.

В геологических терминах природу содомского события можно определить как проявление соляного (точнее, углеводородно-рассольно-соляного) вулканизма, сопровождаемого характерным комплексом сопутствующих образований. Вполне вероятно, что многочисленные выделения самородной серы и асфальта, с которыми связаны древние разработки, встречающиеся преимущественно вдоль западного побережья Мертвого моря [2, рис.2], — реликты и вещественные свидетельства аналогичных более ранних (досодомских) галовулканических событий. Их эпицентры также находились в зоне влияния западного тектонического ограничения грабена.

Вместилищем углеводородов в соленосных толщах могли служить зоны гидроразрывов и трещиноватости, участки, обогащенные вынесенными ранее блоками мезозойских несоляных пород, а также глубоко залегающие подсолевые отложения.

Итак, скорее всего, в тектонически ограниченной солянокупольной структуре Мертвого моря именно соляной вулканизм вполне мог стать оп-

ределяющим процессом катастрофы. А его инициатором — спусковым механизмом — послужили импульсы сеймотектонической активности, характерные для данного региона (в том числе и для рассматриваемого интервала времени). А значит, содомские события можно оценивать как геологически вполне вероятные.

## Природные и техногенные аналоги

Попробуем поискать события, сходные с содомскими, в других солянокупольных областях с близкими геологическими чертами. Такого рода проявления (хотя часто не столь катастрофичные) обнаруживаются в большинстве соленосных бассейнов с активной соляной тектоникой.

Например, в местах с хорошо известными и наиболее изученными рассольными наддиапировыми озерами и полями активного соляного карста (в Днепровском, Соликамском, Прикаспийском, Закарпатском, Персидском и других солянокупольных бассейнах) широко распространены проседания и провалы земной поверхности с образованием воронок и озер, нередко весьма обширных и глубоких (площадью до 100—150 км<sup>2</sup> и глубиной до нескольких сотен метров). Такие проседания нередко сопровождаются обрушениями крупных (весом в несколько тонн) соляных блоков, возникновением вертикальных трещин и т.д. [16]. Им сопутствуют прорывы рассолов, общая масса которых в течение суток достигает многих тысяч кубических метров. Причем эти явления осуществляются неоднократно и зачастую — практически мгновенно.

Еще ближе к содомским по динамике и эмоциональному накалу события, происходящие в Данакильской соленосной впадине (рис.4). Особенно это касается серно-соляных извержений. Здесь, благодаря большой близости к центрам современной вулканической активности, они имеют экстремальное выражение. «Фантастические... гейзеры, пенные выбросы желтой серы и красной ржавчины, взрывные кратеры, дьявольские, отравленные хлором источники... — настоящая кожная болезнь, вызванная деятельностью вулкана, кипящего под толщей соли 5—6 км, завалившей его жерло... Воды... выбиваются наверх в виде кипящего насыщенного раствора... Воды иногда так горячи и обильны, что пар не успевает выйти наружу, и тогда происходят могучие взрывы. Последний... оставил после себя внушительный кратер 100-метровой ширины... Всюду соль, сера, огонь, зной...» [17, с.167].

Заметим, однако, что чаще удается фиксировать следы значительно более древних аналогов содомских событий, восстанавливаемых в разрезах многих солянокупольных бассейнов [11, 18]. Именно с такими палеособытиями с масштабными прорывами глубинных рассолов, углеводоро-

дов и сероводорода, по-видимому, связаны мощные брекчиевидные комплексы. Они формировались в кровле и в обрамлении диапиров, которые воздымались либо над палеоповерхностью Земли, либо среди рассольных (солеродных) палеоводоемов.

Если же вспомнить, что Мертвое море называется также и Асфальтовым, то в число природных явлений, близких содомским, можно включить и разнообразные мощные нефтяные извержения и излияния. Это и масштабные подводные нефтасфальтовые потоки, и асфальтовые вулканы, и их разнообразные производные [11, 18]. Возможно, именно подобные нефтяные излияния сформировали главное асфальтовое богатство Мертвого моря. Было это до содомских событий, поскольку содомитяне уже успешно его использовали. Однако и в последующие столетия масштабы асфальтовых образований здесь были весьма впечатляющими.

Колоссальные катастрофические выбросы углеводородов при грязевулканических извержениях хорошо известны. Они неоднократно описаны — начиная с «бушующего губительного пламени», которое упоминалось уже в Одиссее [19], и кончая недавними огненными столбами, наблюдаемыми при очередных грязевулканических извержениях в Азербайджане. Очень часто они сопровождаются огромной силы взрывами, выбросами мощнейших (высотой до 1 тыс. м) струй углеводородных газов и их самовоспламенением с появлением высоких (более 200—300 м) огненных столбов, а также мощными излияниями сопочных грязей, брекчий и др. Яркое описание еще одного давнего события, заимствованное из материалов историков, приведено в работе Е.Ф.Шнюкова и Н.А.Маслова: «Осенью 63 г. до н.э. землетрясение двумя толчками силой 9 баллов разрушило столицу Боспорского царства... Дворец царя Митридата треснул и был наполовину разрушен, из трещин вылились струи “удушливого сернистого газа”... море горело и взыграло..., из глубин извергались сероводород и метановые факелы» [19, с.86].

Совсем недавно, 13 марта 2012 г. произошло очередное извержение грязевого вулкана Шыхзейрли на территории Гобустанского р-на Азербайджана, которое сопровождалось выбросами грязи, огнем, грохотом. Пламя поднялось на высоту более 70 м. На поверхности земли появились трещины шириной до 0.5 м.

Многие известные выбросы углеводородов, происходившие в солянокупольных областях, возможно, связаны не с грязевым, а с весьма сходным по морфокинетическим признакам рассольно-соляным вулканизмом.

Не менее эффектны техногенные катастрофы, происходящие, к сожалению, все чаще и масштабнее. Гигантские выбросы углеводородных газов с высокими концентрациями сероводорода, сопровождаемые самопроизвольными возгорания-

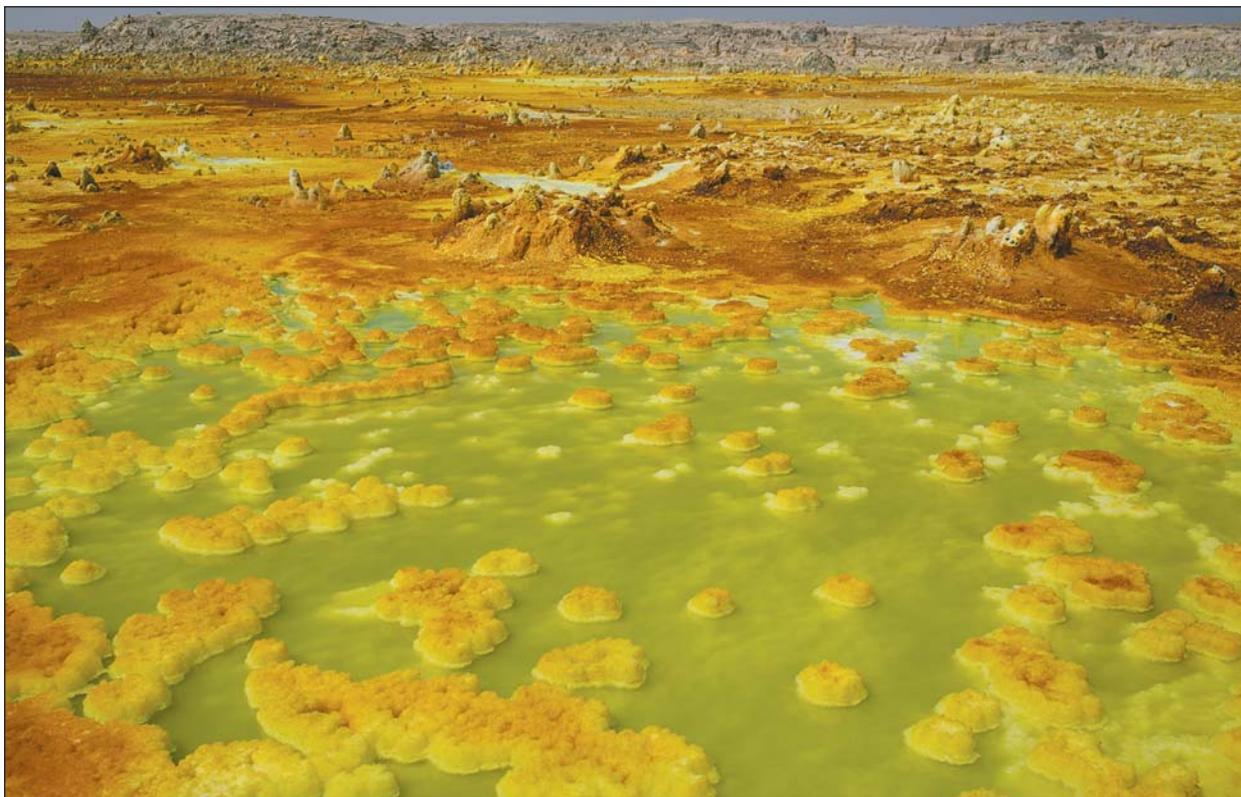


Рис.4. Соляная долина Данакильской впадины (вверху) и извержения вулкана Даллол, покрывающие всю поверхность серой, солью, рассолами [flickr.com].

ми, — частые события на аварийных скважинах на нефтегазовых месторождениях солянокупольных бассейнов. На эксплуатируемых соляных месторождениях Прикаспийского, Соликамского, Днепровского, Припятского и других бассейнов нередко образуются проседания, обрушения кровли солей и земной поверхности, огромные (глубиной более 100 м) наземные и подземные провалы, которые из-за быстрого подъема уровня рассолов превращаются в техногенные рассольные озера. Катастрофическое засоление земель с образованием бесплодных выжженных территорий — еще один печальный итог эксплуатации многих соляных месторождений. Как, впрочем, и большинства месторождений нефти и газа.

Весьма показательно, что техногенные катастрофы чаще всего происходят там же, где и природные, но «благодаря содействию» человека, нередко с гораздо более высокими скоростями, да и выражены они зачастую намного ярче.

\* \* \*

Итак, на вопрос: «Могла ли Содо́мская катастрофа быть отражением реального геологического

события?», мне кажется, можно дать достаточно уверенный утвердительный ответ.

Закономерно вписываясь в летопись природных событий в жизни Мертвого моря, библейская легенда сама выступает как свидетельство происходивших здесь геологических катаклизмов. А это весьма ценно, поскольку, к сожалению, «геологу редко приходится сталкиваться с непосредственными признаками динамической деятельности структуры, которую он исследует» [20, с.52]. Тем значимее возможность использовать многочисленные библейские доказательства. Не исключено, что и некоторые из наблюдаемых ныне ярких проявлений жизни Мертвого моря формируют не только запись еще не завершенных событий, но и будущие легенды.

Одно очевидно: и необычные свойства Мертвого моря, и его знаменитые мифы фокусируют и отражают многообразную жизнь очага разгрузки соленосных и, по-видимому, нефтегазоносных недр, ответственные за возникновение этой легендарной природной аномалии. Само же Мертвое море может служить моделью активно живущей углеводородно-рассольно-соляной системы. ■

## Литература

1. Беленицкая Г.А. Соленосное чудо планеты // Природа. 2013. №6. С.21—32.
2. Беленицкая Г.А. Происхождение солей, диапиров и рассолов Мертвого моря // Природа. 2013. №8. С.28—37.
3. Беленицкая Г.А. Жизнь соленосных недр Мертвого моря и его аналогов // Природа. 2013. №10. С.40—49.
4. Библейская энциклопедия. М., 1990.
5. Clapp F.G. Geology and bitumens of the Dead sea area, Palestine and Transjordan // Bull. AAPG. 1936. V.20. №7. P.881—909.
6. Neev D., Emery K.O. The Dead sea depositional processes and environments of evaporates. Jerusalem, 1967.
7. Гилат А. Содом и Гоморра: гидротермальные взрывы и самовозгорание горючих газов, вызванные землетрясением? // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. М., 2010.
8. Трифонов В.Г., Эль-Таир Ю. Библейская легенда глазами геологов // Природа. 1988. №8. С.34—45.
9. Верба М.Л. Библейские легенды глазами геолога: Исторические и геологические свидетельства современного рифтогенеза. СПб., 2008.
10. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Геомифология — новое направление в науке // Природа. 2009. №4. С.9—17.
11. Юдович Я.Э. За что Бог покарал Содом и Гоморру? Мнение геологов // Урал. геол. журнал. 2011. С.14—22.
12. Беленицкая Г.А. Мексиканский соляно-нефтяной реактор // Природа. 2011. №3. С.18—31.
13. Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях // Тр. ВНИГРИ. Вып.233. Л., 1964.
14. Леворсен А. Геология нефти и газа. М., 1970.
15. Перродон А. История крупных открытий нефти и газа. М., 1994.
16. Дзенс-Литовский А.И. Соляные озера СССР и их минеральные богатства. Л., 1968.
17. Тазиев Г. Запах серы. М., 1980.
18. Беленицкая Г.А. Природные соляно-нафтидные гиганты // Природа. 2013. №1. С.11—23.
19. Шнюков Е.Ф., Маслаков Н.А. Потенциальная опасность грязевого вулканизма для судоходства // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. №2. С.81—91.
20. Бейли В. Проблема Мертвого моря (рифтовая или рамповая долина). Л., 1934.

# Загадка амурского хариуса

Памяти Полины Яковлевны Тугариной  
и Игоря Александровича Черешнева,  
выдающихся исследователей рыб Сибири  
и Дальнего Востока посвящается.

А.Л.Антонов,  
кандидат биологических наук  
Институт водных экологических проблем ДВО РАН  
Хабаровск  
И.Б.Книжин,  
доктор биологических наук  
Иркутский государственный университет

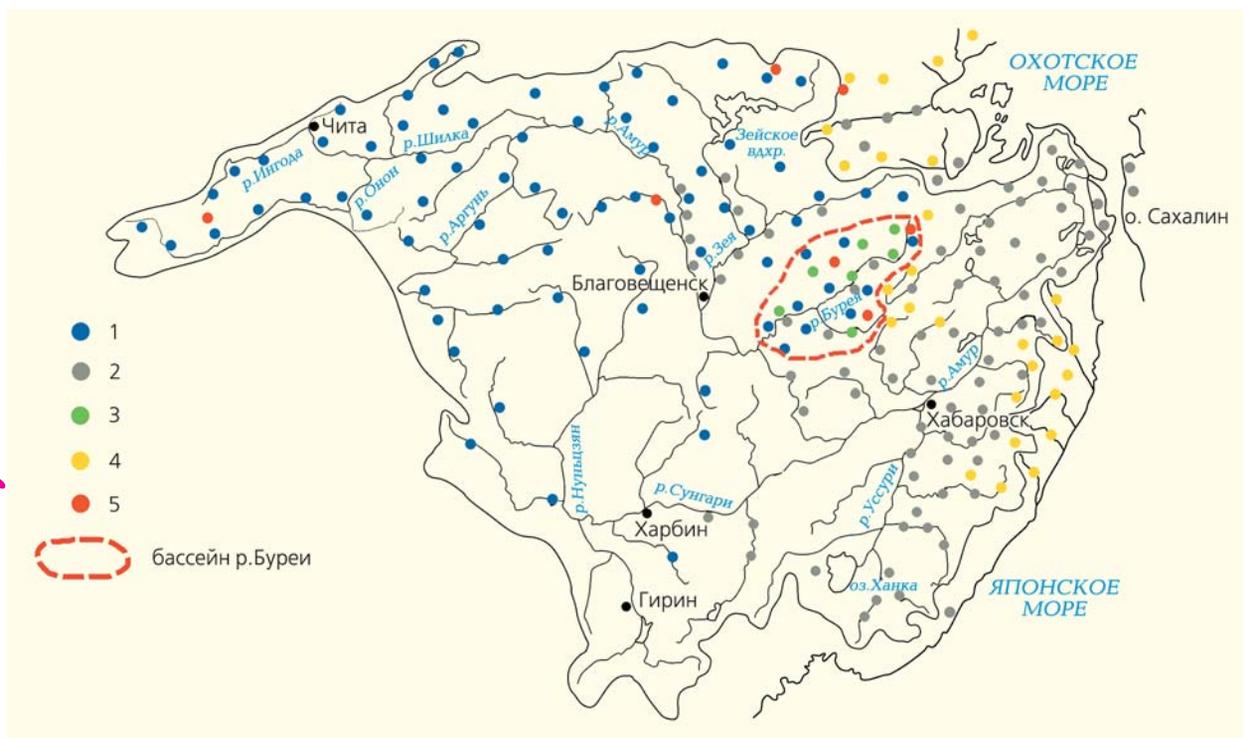
**Х**ариусы — одни из самых распространенных и красивых рыб в сибирских и дальневосточных реках. В бассейне Амура они населяют все горные и предгорные водотоки. Еще в 1775 г. И.Г.Георги впервые для бассейна Амура отметил хариуса в небольших речках у г. Нерчинска (бассейн р.Шилки) [1]. Спустя почти век, в 1869 г., известный географ и зоолог Б.И.Дыбовский, изучая рыб р.Онон, описал хариуса из системы Амура как вид *Thymallus grubii* [2]. Позднее выдающийся российский ихтиолог и географ Л.С.Берг заметил, что экземпляр, доставленный ему из р.Амгунь (приток Нижнего Амура), отличается от описанного Дыбовским [3]. Недостаток материала не позволил тогда Бергу определить статус этой формы и он лишь предположил, что, кроме амурского, в бассейне Амура могут обитать и другие представители семейства хариусовых.

Рыболовы, охотники и геологи знают, что иногда хариусы в одних и тех же реках бассейна Амура имеют разную окраску тела и спинного плавника, иные пропорции. Особенно выделяется разнообразием один из крупных левых притоков Среднего Амура — р.Бурея. До недавнего времени считалось, что в системе Амура обитает всего один представитель семейства — амурский хариус. Его первое подробное описание появилось в 1936 г. [4]. Тогда А.Н.Световидов исследовал музейные экземпляры, собранные из разных частей бассейна и за его пределами, — четыре экземпляра из р.Шаньши (бассейн р.Сунгари), два — из р.Пикан (приток р.Зея), по одному — из рек Камра (окрестности г.Николаевска-на-Амуре), Налео (Амурский лиман), Амгунь (тот же экземпляр был

у Берга)\* и Бира (бассейн Среднего Амура), а также из устья р.Уда и из р.Ола (окрестности Магадана, бассейн Охотского моря). Фиксированные рыбы утратили изначальную окраску, что, вероятно, и повлияло на общие выводы об изменчивости, морфологии и статусе рыб, которых Световидов причислил к сибирскому подвиду. Одному из нас удалось ознакомиться в коллекции ЗИНа РАН (Санкт-Петербург) с некоторыми изученными Световидовым экземплярами. Все четыре рыбки из р.Шаньши и обе из р.Пикан оказались типичными амурскими хариусами (по описанию Дыбовского); а экземпляры из рек Камра, Налео и Амгунь, несомненно, — нижеамурскими (*Tb.tugarinae*). На рисунке в работе Световидова (как иллюстрация амурского хариуса) изображен типичный нижеамурский хариус из р.Камра. Таким образом, характеристика амурского хариуса получилась весьма неточной.

До конца 1970-х — начала 1980-х годов особенностями морфологии хариусов, населяющих бассейн Амура, почти не привлекали внимание ихтиологов, хотя в этот период и вышли фундаментальные работы Л.С.Берга [5] и Г.В.Никольского [6]. Большинство исследователей (вслед за Световидовым) понимали под амурским хариусом нижеамурского. Чешские ихтиологи К.Пивничка и К.Хенсел, изучая род *Thymallus* и анализируя признаки рыб из р.Керулен (бассейн Верхнего Амура), доказали видовой статус амурского хари-

\* Световидов отметил, что он «...мало отличается от типичных амурских; мы его провизорно считаем за *Tb. arcticus grubii*» [4, с. 211]. Это ошибочный вывод. Как показали наши дальнейшие исследования, в бассейне р.Амгунь нет этого хариуса, здесь обитают нижеамурский и желтопятнистый.



Распространение хариусов в бассейне р.Амура и на сопредельных территориях: 1 — верхнеамурский; 2 — нижеамурский; 3 — буреинский; 4 — желтопятнистый; 5 — ленский.

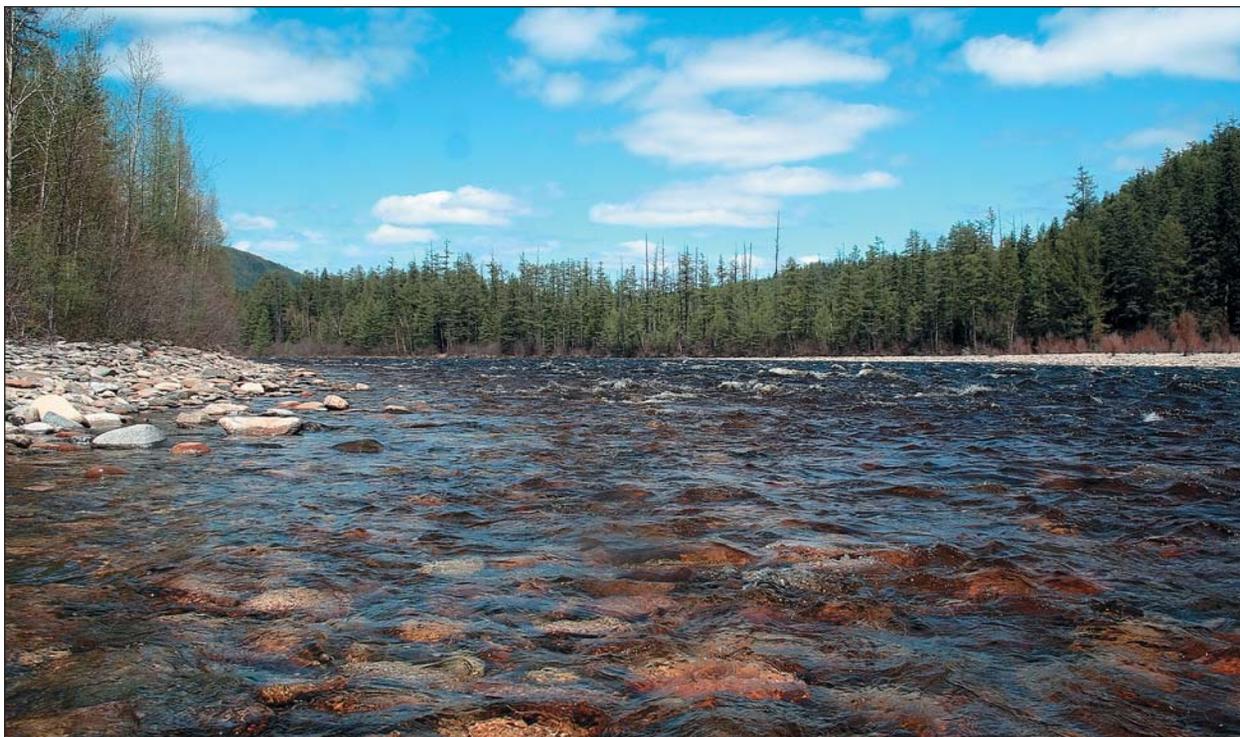
уса. Не имея сборов из других частей бассейна, они считали, что в Амуре обитает только один представитель семейства [7].

Впервые на различия между рыбами из верховой и низовой Амура обратили внимание известный специалист по хариусовым П.Я.Тугарина и ее ученица В.С.Храмцова [8]. У рыб из р.Хор (притока р.Усури) и из рек Сомня и Им (притоки р.Амгуни) они отметили характерную окраску (на боках — ряды ярко-оранжевых пятен, а по верхнему краю спинного плавника — широкая темно-красная полоса) и несхожесть с хариусом, описанным Дыбовским. Авторы пришли к выводу о морфологической неоднородности амурского хариуса, но латинское название *Th. grubii* оставили и за рыбами из низовой Амура. В дальнейшем Л.А.Скурихина с соавторами обнаружили, что генетические различия между хариусами из верховой и низовой Амура довольно велики [9], что позволяет считать их разными видами. Позднее С.В.Шедько сообщил, что в реках побережья Приморского края и в бассейне Амура обитают, предположительно, два вида (*Th. sp. 1* и *Th. sp. 2*), отличные от *Th. grubii* [10].

Подводя итог, отметим ряд причин, которые, по нашему мнению, повлияли на столь длительное выявление разнообразия хариусов Амура. Во-первых, это использование фиксированных экземпляров, утративших окраску (при этом иногда в выборках были представители разных видов и подвидов). Во-вторых, — низкая изученность

морфологии и экологии популяций из разных частей бассейна и почти полное отсутствие молекулярногенетических данных. Наконец, сложившиеся представления ведущих российских ихтиологов (Л.С.Берга, А.Н.Световидова, Г.В.Никольского, Ю.С.Решетникова, Е.А.Дорофеевой, Е.А.Зиновьева) о структуре рода *Thymallus* и статусе амурского хариуса как подвида сибирского.

Итак, к середине 1980-х годов выяснилось, что хариус в бассейне Амура, возможно, представлен двумя видами. Но как показали наши исследования, разнообразие этого семейства оказалось здесь гораздо богаче. В 1993—1996 гг. А.Л.Антонов в верхнем течении Буреи (бассейн Среднего Амура) обнаружил три морфологически различные формы хариусов: одна соответствовала амурскому, вторая нижеамурскому, а третья не отвечала диагнозам известных видов и подвидов [11]. Ее условно назвали «крупночешуйной», предположив, что это подвид восточносибирского хариуса, у которого на спинном плавнике имеется похожий рисунок. Анализ публикаций, консультации со специалистами по восточносибирскому хариусу И.А.Черешневым и М.Б.Скопечом, а также собственные данные дали основания описать «крупночешуйного» в 2004 г. как новый эндемичный вид — буреинский хариус *Th. burejensis* [12]. Позже в этом же бассейне нашли еще один вид — ленский (*Th. sp.* или *Th. lenensis*), основная часть ареала которого приходится на бассейн р.Лены. Таким образом, выяснилось, что



Река Правая Буряя — зона совместного обитания трех видов хариусов — бурейнского, ленского и амурского.

Здесь и далее фото авторов

бассейн р.Буряя служит уникальной зоной симпатрии, где совместно обитают четыре вида хариусов: амурский, нижнеамурский, бурейнский и ленский.

В мае 1996 г. в верховьях р.Анжуй (бассейн нижнего Амура) мы нашли еще одну новую форму, позже описанную как желтопятнистый хариус *Th. grubii flavomaculatus* [13]. Необычной окраской и формой спинного плавника он отличается от описанных к тому времени хариусов. В дальнейшем он был отловлен в р.Тумнин и в притоках р.Хор — Чуен и Сукпай. В июле 2001 г. участники международной экспедиции (А.Л.Антонов, И.Б.Книжин, С.Дж.Вайс и Э.М.Фруфе) нашли его в р.Мерек (приток р.Амгунь), а в мае 2002 г. во время совместной экспедиции Института водных экологических проблем ДВО РАН и Хабаровского филиала ТИНРО — в р.Хосо (приток р.Гур). Позже мы нашли его в других крупных реках бассейна Амура — в верховьях р.Бикин, в реках Кербин, Нимелен, Кур и Урми.

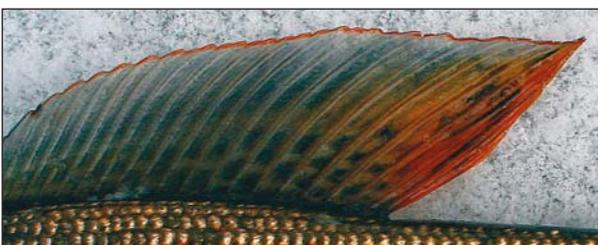
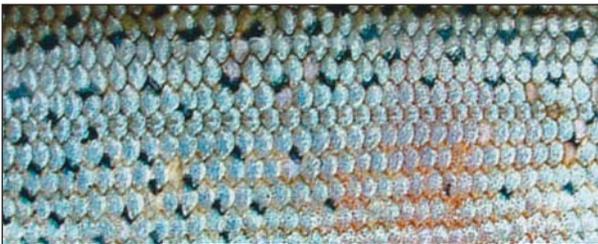
Как уже говорилось, в системе Амура был обнаружен и ленский хариус, несколько экземпляров которого впервые отловили еще в 1996 г. в притоках Бурей. Изначально их идентифицировали как темно окрашенных амурских или гибридных особей. В 2003 г. рыб такого же фенотипа обнаружили в р.Джермолтай (приток р.Онон), а в 2009 г. в р.Ток (бассейн Зеи).

Необходимо подчеркнуть, что определение таксономического статуса этих хариусов было бы

невозможным без генетических исследований. К началу третьего тысячелетия накопленные данные свидетельствовали об обитании в бассейне Амура, кроме амурского хариуса, еще как минимум трех других видов. Однако малый объем материала, отсутствие данных по морфологии других представителей рода из всего ареала и недостаток генетических данных не позволяли провести полноценную ревизию хариусов Амура. Установить их таксономический статус и филогенетические отношения помогло активное участие в исследованиях зарубежных генетиков — С.Вайса и Э.Фруфе. Полученные ими результаты указывают на репродуктивную изоляцию этих хариусов, в том числе в условиях полной или частичной симпатрии [14].

Приведем краткое описание пяти таксономических представителей семейства хариусовых, обитающих в бассейне Амура.

**Верхнеамурский хариус** *Th. grubii grubii* — изящная красивая рыбка средних (до 30 см) размеров. Форма серебристого тела прогонистая, вальковатая. Вдоль боковой линии — ряды мелких черных пятен различной формы (округлой, v-образной, s-образной и др.). На боках, над брюшными плавниками или спереди от них — медно-розовое пятно с размытыми краями. Чешуя мелкая, в боковой линии более 90 чешуй. По верхнему краю сравнительно короткого спинного плавника — темно-красная кайма (ниже пятна такого же цвета), кото-



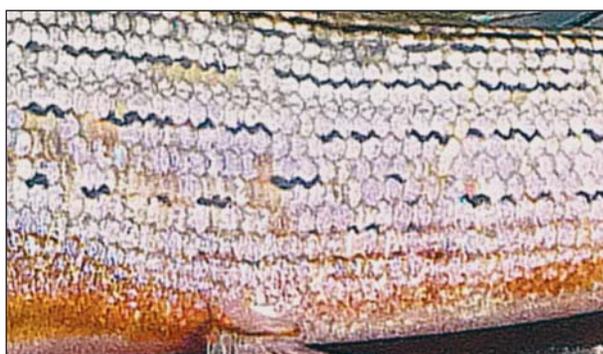
Верхнеамурский (вверху) и желтопятнистый хариусы. Под снимками приведены фото с характерными цветовыми признаками на частях тела: рядами черных пятен вдоль боковой линии и медно-розовым пятном над брюшным плавником у верхнеамурского хариуса и с узкой красно-алой каймой на спинном плавнике у желтопятнистого.

Фото авторов



Нижнеамурский (вверху) и буреинский хариусы. Под изображениями показаны отличия каждого вида. У первого из них это ряды ярко-оранжевых полос вдоль боковой линии и широкая темно-красная кайма поверх спинного плавника, а ниже ее — ряды такого же цвета крупных пятен. У второго вида плавник без цветной каймы по краю, но с прерывистыми темно-красными полосами на межлучевых перепонках.





Ленский хариус. На приведенных внизу фото на боках рыбы видны полосы черных мелких зигзагообразных пятен, идущих между рядами чешуи, и черное пятно под нижней челюстью.

рая у самцов шире, чем у самок (от 7 до 10 мм). Обитает во всех реках Верхнего и Среднего Амура. Вне бассейна есть в р.Ялу, впадающей в Желтое море [15].

**Желтопятнистый хариус** *Tb. grubii flavomaculatus* не менее красив, но более массивного сложения, размеры до 40 см. Сильно отличается от амурского по окраске. На боках ярко-оранжевые прерывистые полосы. У крупных рыб нижняя часть тела с желто-оранжевым оттенком. Ниже боковой линии в передней части тела — мелкие черные пятна (обычно 7—10, до 15—18), изредка их нет вовсе. По верху спинного плавника идет узкая красная кайма (до 7—8 мм у крупных самцов). В задней части его расположено темно-желтое пятно, за что этот хариус и назван желтопятнистым.

Различия между желтопятнистым и нижеамурским хариусами в окраске тела и спинного плавника достаточно велики и, на первый взгляд, их можно считать отдельными видами. Но их сходство по ряду меристических признаков и по ДНК не позволяет считать их самостоятельными видами [14]. Их ареалы не перекрываются — желтопятнистый обитает в верховьях всех больших рек бассейна Нижнего Амура (Кур, Урми, Аной,

Гур, Амгунь, возможно, Горин); найден в двух притоках р.Уссури (верховьях Хора и Бикина), в больших реках бассейна Японского моря — Тумнин, Коппи, Ботчи. Есть он и в реках Максимовка и Самарга [10]; а также в реках юго-западного Приохотья — Уда, Тугур (М.Б.Скопец, личное сообщение), Киран (наши данные).

**Нижнеамурский хариус** *Tb. tugarinae*, названный в честь Тугариной, достаточно крупный, до 36 см [16]. Тело сравнительно высокое, сжатое с боков. Вдоль боковой линии между рядами чешуи, как и у желтопятнистого, расположены ярко-оранжевые прерывистые полосы. По верхнему краю спинного плавника — широкая (у самцов до 20 мм; у самок до 10) темно-красная кайма, а ниже — полоса из крупных пятен того же цвета. У особей из небольших рек предгорий у основания спинного плавника есть черные мелкие пятна. У жаберной крышки, ниже боковой линии — темное каплевидное пятно размером больше зрачка. Населяет все реки Нижнего и Среднего Амура за исключением самых верховий крупных рек, есть на северо-западе Сахалина. Найден в р.Киевка (бассейн Японского моря) [10], а также в реках Тугур и Уда (М.Б.Скопец, личное сообще-

ние). Вверх распространен до р.Большой Невер и притоков среднего течения р.Зея, возможно, и выше; по сведениям рыболовов, встречается даже в р.Ингода.

**Буреинский хариус** *Tb. burejensis* — самый крупный в бассейне Амура — до 48 см. Тело высокое, массивное; чешуя крупная, плотно сидящая. Окраска близка к нижеамурскому, но полосы на боках менее яркие, светло-коричневого (буроватого) цвета. В передней части тела расположено от 3 до 23 (чаще 6—12) черных пятен. По верхнему краю спинного плавника у самцов и самок, в отличие от всех других хариусов Амура, нет красной каймы. На его межлучевых перепонках параллельно лучам расположены прерывистые темно-красные полосы, а у основания — небольшие пятна. Эндемик бассейна Буреи, на большей части ареала обитает совместно с амурским, нижеамурским и ленским хариусами.

Таксономический статус **ленского хариуса** *Tb.sp* или *Tb. lenensis* определен в ранге вида, но вопрос о его научном названии еще дискутиру-

ется. Это рыбы до 35 см, но встречаются (по опросным данным) и более крупные. Тело низкое, вальковатое, основание спинного плавника короткое. Между рядами чешуй черные мелкие зигзагообразные пятна, сгруппированные в ряды, на боках, над брюшными плавниками нет медно-красных пятен. В бассейне Амура, как уже говорилось, найден в р.Джермолтай (бассейн Онона), верховьях рек Зея и Бурея; на китайской части — в р.Амуэрхэ [17]. Обитает и в верховьях р.Селемджа (есть экземпляры из р.Бурунда в Норском заповеднике). Населяет также бассейн р.Лена; найден в верхнем течении р.Мая-Удская, в реках северо-восточной части Байкала и в верховьях притоков р.Нижняя Тунгуска.

Итак, в бассейне Амура семейство хариусовых представлено пятью морфологически различными формами, четыре из которых имеют статус вида (амурский включает два подвида). Такое разнообразие хариусов возникло в результате сложнейших палеогеографических событий, произошедших в этом регионе. ■

**Исследования поддержаны РФФИ и Правительством Хабаровского края (грант №01-04-96305), а также ДВО РАН (гранты №№03-3А-06-012, 06-IIIД-06-247, III-Д-06-006, 09-III-А-06-222, 10-III-Д-06-024, комплексная программа «Амур»).**

## Литература

1. *Georgi I.G.* Bemerkungen einer Reise im Russischen Reich in Jahre 1772. Berlin, 1775. Bd.1.
2. *Dybowski B.N.* Vorlanfige Mittheilungen über die Fischfauna des Ononflusses und des Ingoda in Transbaicalien // Verh. zool.-bot. Ges. Wien. 1869. V.19. S.209—222.
3. *Берг Л.С.* Рыбы бассейна Амура // Записки Импер. АН. Физико-матем. отд. Сер.8. 1909. Т.24. №9.
4. *Световидов А.Н.* Европейско-азиатские хариусы (Genus *Thymallus* Cuvier) // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1936. Т.3. С.183—301.
5. *Берг Л.С.* Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. М.; Л., 1948. Ч.1.
6. *Никольский Г.В.* Рыбы бассейна Амура. М., 1956.
7. *Pivnicka K., Hensel K.* Morphological variation in the genus *Thymallus* Cuvier, 1829 and recognition of the subspecies // Acta Univ. Carolinae. Biologica. 1978. V.4. P.37—67.
8. *Тугарина П.Я., Храмова В.С.* Морфофизиологическая характеристика амурского хариуса *Thymallus grubei* Dyb. // Вопр. ихтиологии. 1980. Т.20. №4. С.590—605.
9. *Скурухина Л.А., Медников Б.М., Тугарина П.Я.* Генетическая дивергенция хариусов (*Thymallus*) Евразии и «сети видов» // Зоол. журн. 1985. №1. С.245—251.
10. *Шедько С.В.* Список круглоротых и рыб пресных вод побережья Приморья // Чтения памяти В.Я.Леванидова. Вып.1. Владивосток, 2001. С.229—249.
11. *Антонов А.Л.* О хариусах (род *Thymallus*) реки Бурея (бассейн Амура) // Вопр. ихтиологии. 1995. Т.35. №6. С.831—834.
12. *Антонов А.Л.* Новый вид хариуса *Thymallus burejensis* sp. nova (Thymallidae) из бассейна Амура // Вопр. ихтиологии. 2004. Т.44. №4. С.441—451.
13. *Книжин И.Б., Антонов А.Л., Вайс С.Дж.* Новый подвид амурского хариуса *Thymallus grubii flavomaculatus* ssp. nova (Thymallidae) // Вопр. ихтиологии. 2006. Т.46. №5. С.581—589.
14. *Книжин И.Б., Вайс С.Дж., Антонов А.Л., Фруфе Э.* Морфологическое и генетическое разнообразие амурских хариусов (*Thymallus*, Thymallidae) // Вопр. ихтиологии. 2004. Т.44. №1. С.59—76.
15. *Ma Bo, Huo Tang-Bin, Jiang Zuo-Fa.* *Thymallus arcticus yaluensis* is a synonym of *Thymallus grubii* by mitochondrial control region sequences analysis // Acta zootaxonomica Sinica. 2008. V.33. №2. P.414—419.
16. *Книжин И.Б., Антонов А.Л., Вайс С.Дж., Сафронов С.Н.* Новый вид хариуса *Thymallus tugarinae* sp. nova (Thymallidae) из бассейна Амура // Вопр. ихтиологии. 2007. Т.47. №2. С.139—156.
17. *Ma Bo, Jiang Zuo-Fa.* Taxonomic status of three fish species in *Thymallus* from upper Heilongjiang River based on mitochondrial control region sequence variation // Journal of Fishery Sciences of China. 2011. V.3. №18. №2. P.1—8.

# Непрошенный гость — лисица на острове Тюленьем

А.Е.Кузин,  
кандидат биологических наук  
Тихоокеанский научно-исследовательский  
рыбохозяйственный центр  
Владивосток





Лежбище морских котиков на южном побережье острова.

Фото автора

В 12 милях от мыса Георгия на Сахалине расположен о. Тюлений площадью всего 0,07 км<sup>2</sup> (655 м в длину и около 110 м в ширину). По сути, это — узкая, вытянутая с северо-запада на юго-восток, местами отвесная скала, обрамленная песчано-галечными пляжами и лишенная древесной растительности. Остров известен крупнейшим гаремным лежбищем морских котиков (*Callorhinus ursinus*): в настоящее время там обитает 115—120 тыс. взрослых животных и каждый год рождается 31—35 тыс. детенышей.

В последние годы здесь стали интенсивно размножаться и сивучи (*Eumetopias jubatus*): ежегодно на свет появляется почти тысяча щенков, а численность взрослого поголовья уже превысила 2 тыс. особей. Есть и небольшая залежка ларги (*Phoca larga*), численность которой непостоянна и колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен особей, а весной — до тысячи.

Славится о. Тюлений и птичим базаром. Самый массовый на острове вид — толстоклювая кайра (*Uria lomvia*), ее численность превышает 250 тыс. особей. Кроме того, там гнездятся такие морские птицы, как тонкоклювая кайра (*U.aalge*), чайки — тихоокеанская (*Larus schistisagus*) и моевка (*Rissa tridactyla*), конюги — большая (*Aethia cristatella*) и крошка (*Apusilla*), белобрюшка (*Cyclorhynchus psittacula*), а также тупик-носорог (*Cerorhinca monocerata*), старик (*Syntliboramphus antiquus*) и топорок (*Lunda cirrhata*). В отдельные годы единично делают кладки одна-две пары глупышей (*Fulmarus glacialis*) и пара ипаток (*Fratercula corniculata*).

Остров находится под строгой охраной, и на его территории действуют «Правила охраны и промысла морских млекопитающих», запрещающие содержать собак в целях предупреждения занесения заболеваний.

© Кузин А.Е., 2014



Лисица на крыше лаборатории (вверху) и тупик-носорог.

Фото С.М.Артемьевой



Тушки задавленных лисицей тупиков-носорогов.

Фото автора

Летом 2013 г. на острове объявился непрощенный гость — лисица (*Vulpis vulpis*). Попастъ сюда она могла либо весной с выносными льдами, либо зимой по сплошному льду. Это первый случай в истории острова, когда на его территорию проникает хищник с «большой земли». Выжить ему здесь несложно. С осени на зиму остаются трупы животных. Ранней весной прилетают сюда птицы, которые строят гнезда на всей территории острова, обживая его от подножия скалы до верхнего плато.

Однако лисица проявила большую избирательность в выборе пищи. В основном она специализировалась на тупиках-носорогах, большая часть колонии которых жила под домом, стоящим на вершине скалы.

Рано утром птицы выходили на край скалы и оттуда отправлялись в море. Расстояние от подвала дома до края скалы не превышало пяти метров. На этом участке лисица и подстерегала птиц. Охотилась она в темное или предрассветное время суток, поскольку днем с пяти утра до девяти вечера этот участок постоянно «патрулировали» научные сотрудники, проводящие учет морских млекопитающих на острове. Птицы не боялись людей и не взлетали от проходившего в метре от них человека. Скорее всего, не реагировали они и на лисицу. Почему она выбирала в основном тупиков-носорогов, осталось для нас загадкой. Более доступной и обильной пищей для нее были бы кайры, но лисица их не трогала. Лишь иногда среди выпотрошенных ею тушек попадались трупы стариков, еще реже — птиц других видов. Старики вообще малочисленны на острове, а в месте, где охотилась лисица, и вовсе жило всего несколько пар этих ночных птиц.

Мы прибыли на остров 8 июня 2013 г. и обнаружили в одном месте около 50 тушек тупиков-носорогов, которых сразу сожгли, предположив, что птицы погибли из-за какого-то заболевания.



Одно из двух крупных скоплений кайры на острове.

Фото автора

ния. Однако в последующие дни стали появляться свежие трупы, а вскоре на глаза (и объектив фотоаппарата) попала и лисица, что прояснило ситуацию с гибелью птиц. В целом за период с 8 июня по 26 июля лисица задавила 75 тупиков-носорогов, семь стариков, двух конюгов и одну кайру.

Какой урон лисица нанесла колонии тупиков-носорогов, можно судить по следующему показателю. Если в прошлые годы на «взлетной площадке» скалы по утрам мы регистрировали

до 70 особей, то в этом году к концу нашего пребывания на острове (26 июля) — лишь по пять—семь. Вероятно, колонию тупиков-носорогов на о. Тюленьем лисица почти полностью уничтожила. Могли сохраниться лишь несколько пар этих птиц, гнездящихся в других местах острова. Последние пять дней нашего пребывания на острове лисица не появлялась на своем охотничьем участке и не трогала птиц. Ее жертвами в те дни, видимо, стали другие обитатели острова. После нашего отъезда

лисица, оставшись на острове полноправной хозяйкой, наверняка продолжит охоту на тупиков-носорогов или переключится на других птиц. Кто станет для нее следующей жертвой — неизвестно. Легкая и очень нежная добыча — подростки птенцы кайры, которые начнут спускаться со скалы. Не исключено, что лисица будет вынуждена питаться падалью. В сезон размножения морских котиков гибнет до 4 тыс. новорожденных щенков и около сотни взрослых особей этого вида тюленей. ■

# КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ЗНАКОМАЯ И НЕЗНАКОМАЯ

К Международному году кристаллографии

Наступивший 2014 год ООН объявила по следам событий столетней давности Международным годом кристаллографии. В 1913 г. Лоуренс Брэгг впервые определил пространственное строение вещества: с помощью картины дифракции рентгеновских лучей (лауэграммы) он смог показать, как расположены атомы в щелочно-галогидных изоморфных кубических кристаллах NaCl, KCl, KBr, KI. А его отец, Генри Брэгг, тогда же создал прообраз современных дифрактометров – рентгеновский спектрометр, на котором они вместе расшифровали структуру алмаза.

Относительно места кристаллографии в современной науке существуют различные мнения – выделять ли ее по-прежнему в отдельную дисциплину или считать просто разделом физики твердого тела (точнее, теперь уже физики конденсированных сред). Но в концептуальном плане ее роль не ограничивается развитием структурного анализа и материаловедения. Именно в ней «выкристаллизовались» идеи симметрии, которые сейчас лежат в основе представлений о мироздании. Главным организатором мероприятий тематического года выступает Международный союз кристаллографов. Наши авторы тоже не останутся в стороне – читайте в этом и следующих выпусках журнала как о работах в духе традиционной кристаллографии, так и о исследованиях новыми методами.

Благодарности и поздравления

Друзья кристаллографы,

Позвольте мне на 80-м году жизни обратиться к Вам с глубокой и искренней волнующей просьбой: не вытаскивать из своих рук знамя этой Кристаллографии как самостоятельной науки, не сводимой целиком ни к кристаллофизике, как того хотят некоторые физики, никогда не изучавшие кристаллографию, ни к кристаллохимии, как того хотят некоторые химики, а иногда и сами кристаллографы. В свое время крупнейший кристаллограф Э.С. Федоров

принимал кристаллографию за основу всех наук о неорганической природе. В настоящее время мы видим как наша наука проникает и в ряд наук о живой природе.

Это собрание объединяет всех звезд кристаллографов мира. От нас зависит дальнейшее процветание нашей науки. Давайте же все силы и новые успехи на этом пути

19 VII 66

Послание А.В.Шубникова участникам VII Международного конгресса кристаллографов (Москва, 12—21 июля 1966 г.)

# Предыстория Института кристаллографии АН СССР



Н.М.Щагина

Создание нашего института (1943 г.) неразрывно связано с академиком Алексеем Васильевичем Шубниковым, 125-летие которого отмечалось в 2012 г. Организация в Академии наук СССР самостоятельного учреждения кристаллографического профиля была непростой и драматичной, в ее предыстории можно проследить несколько периодов.

## Екатеринбургский период (1920—1924)

Свою первую «кристаллографическую ячейку» — кафедру кристаллографии в Уральском горном институте (Екатеринбург) — Шубников организовал с нуля в 1920 г. Горный институт в ранге факультета тогда входил в состав Уральского государственного университета, учрежденного декретом Совета народных комиссаров РСФСР от 19 октября 1920 г. Шубников должен был вести, прежде всего, преподавательскую работу (читать новый курс по кристаллографии) и одновременно «строить» будущую кафедру. Начинать дело пришлось буквально с мебели: своими руками он мастеровил шкафы, стеллажи, столы, табуретки, стулья. Для лекций Алексей Васильевич изготавливал модели кристаллов, наглядные пособия и другой иллюстративный материал, собирал образцы уральских кристаллов



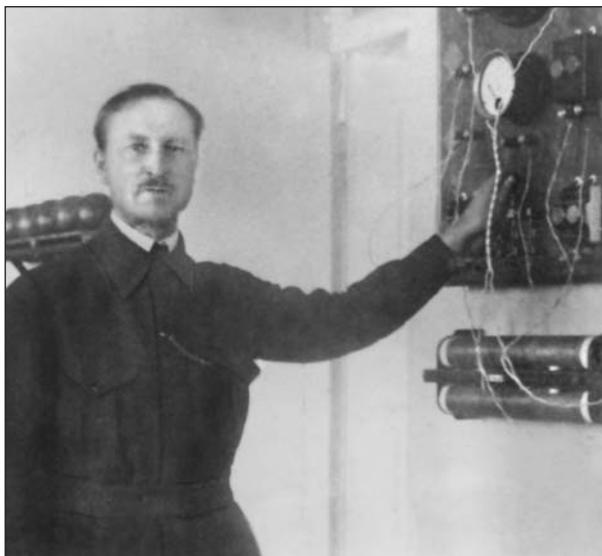
*Нина Михайловна Щагина, сотрудник Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН, признанный специалист в области синтеза и получения кристаллов сегнетоэлектриков из водных растворов. В выращенных ею кристаллах гидросульфатов и гидроселенатов цезия была открыта суперпротонная проводимость, это стало основанием для выделения их в новый класс твердых протонных электролитов. В настоящее время область научных интересов — история отечественной кристаллографии.*

и создавал приборы для научной работы, которую он интенсивно вел с немногочисленными сотрудниками. Финансирование было скудным в это тревожное время — в стране еще продолжалась Гражданская война.

После боев и ухода белой армии из Екатеринбурга прежнее здание Горного института было разрушено и практически все его оборудование уничтожено. У Шубникова была большая семья (пять человек), но он на протяжении всех пяти лет часто тратил существенную часть своей скромной зарплаты на приобретение на черном рынке приборов и инструментов, необходимых для научной работы.

Екатеринбургский период, который можно назвать «эмбриональным» на пути создания Института кристаллографии, был очень важным [1]. Разного рода трудности, сопровождавшие Алексея Васильевича в этот период, только закаляли его. Он приобрел широкую известность серьезного ученого, великодушного организатора и прекрасного преподавателя, а также популяризатора кристаллографии и науки в целом. Одна из встреч в Екатеринбурге с выдающимся естествоиспытателем академиком А.Е.Ферсманом стала судьбоносной для Шубникова. Ферсман, хорошо знакомый с научными достижениями Алексея Васильевича, высоко ценил эрудицию и неистощимую энергию уральского профессора. Он обсудил с Шубниковым возможность переезда в Ленинград.

© Щагина Н.М., 2014



Шубников в лаборатории на созданной им кафедре кристаллографии в Горном институте Уральского государственного университета. Екатеринбург, 1921 г. «Толстовка» с накладными карманами и поясом шита женой Алексея Васильевича Ольгой Михайловной из плюшевых зеленых занавесок, которые она предусмотрительно захватила из Москвы.

Здесь и далее фотографии из архива Института кристаллографии РАН

## Ленинградский период (1925—1934)

В 1925 г. Ферсман приглашает Шубникова переехать в Ленинград для работы в Минералогическом музее\* Академии наук, которым тот тогда руководил. Алексей Васильевич снова принимается за создание — теперь уже лаборатории кристаллографии. Началась работа Шубникова в Академии наук СССР, плодотворно продолжавшаяся до конца его жизни.

Состав лаборатории постепенно сформировался из энтузиастов, увлеченных кристаллами и кристаллографией. Вот имена первых учеников

\* Минеральный кабинет возник в 1716 г. в составе Кунсткамеры, созданной по указу Петра I (1714). Позже он выделился из Кунсткамеры как Минеральный кабинет академии, в 1836 г. получил название Минералогического музея, который в 1898 г. вместе с другими геологическими собраниями Императорской Санкт-Петербургской академии наук был реорганизован в единый Геологический музей. В 1903 г. на короткое время возродился самостоятельный Минералогический музей им. Петра Великого, который в 1912 г. вошел в состав Геологического и минералогического музея им. Петра Великого. К 200-летию Академии наук в 1925 г. музей был разделен на два самостоятельных — Геологический и Минералогический. В 1956 г. Минералогическому музею АН СССР присвоено имя академика А.Е.Ферсмана. — *Примеч. ред.*



Шубников (сидит в центре) среди сотрудников его кафедры и преподавателей других факультетов Уральского государственного университета. Вторая справа — его жена, минералог О.М.Шубникова. Екатеринбург, 1920-е годы.

Шубникова и сотрудников новой лаборатории: Г.Г.Леммлейн, М.П.Шаскольская, Е.В.Цинзерлинг, Б.В.Витовский, К.А.Драгунов, Б.К.Бруновский. Именно эта группа станет стержнем будущей независимой Лаборатории кристаллографии АН СССР, предшественницы Института кристаллографии АН СССР.

Главным научным направлением созданной лаборатории были работы с природным кварцем. Для радиотехники (в частности, военной) требовались надежные стабилизаторы частот, которые изготавливались из кварца. Отмечу, что Алексей Васильевич одним из первых понял прикладное значение кристаллографии. Были также начаты работы по рентгеноструктурному анализу минералов. Необходимую аппаратуру для этих исследований Шубников приобрел в Берлине в 1927 г., когда был в Германии в научной командировке.

С 1930 г. началось формирование академических геологических институтов в нашей стране. Были организованы пять институтов: Геологический, Петрографический, Палеозоологический, Геохимический и Минералогический (на базе Минералогического музея АН СССР).

В 1932 г. при слиянии Минералогического и Геохимического институтов образуется Институт геохимии, минералогии и кристаллографии АН СССР им.М.В.Ломоносова (ЛИГЕМ или, как его часто для краткости называли, Ломоносовский институт). В названии академического института впервые использован термин «кристаллография», что следует считать признанием кристаллографии как самостоятельного направления научных исследований. Несомненно, это стало возможным благодаря глубокому интересу к этой науке крупнейших ученых дореволюционной эпохи — В.И.Вернадского и А.Е.Ферсмана, возглавлявших тогда ряд важнейших научных направлений в стране.



Сотрудники лаборатории кристаллографии Минералогического музея. В среднем ряду — главная «кварцевая» троица» (ведущие специалисты по кварцу): Е.В.Цинзерлинг, А.В.Шубников, Г.Г.Леммлейн; в нижнем ряду: Л.С.Генералова и М.П.Шаскольская. Ленинград, примерно 1929 г.



Сотрудники Минералогического музея. В первом ряду: А.В.Шубников, Е.Е.Костылева, а также его частые гости: сотрудник кафедры В.Б.Татаринов и профессор О.М.Аншелес, заведующий кафедрой кристаллографии Ленинградского университета. Ленинград, вероятно 1928 г.

## Начало Московского периода

В 1934 г. Президиум Академии наук и значительная часть ее институтов были переведены из Ленинграда в Москву. Ломоносовский институт, возглавляемый Ферсманом, также переехал. Так начался московский период жизни — теперь уже кристаллографического сектора под руководством Шубникова. Число сотрудников сектора постепенно увеличивалось по мере расширения исследовательских работ.

Для успешной деятельности сектора была организована специальная мастерская для механических, камнерезных и шлифовальных работ. Интенсивно велись исследования в области симметрии и роста кристаллов, расширялась деятельность по исследованию их морфологии, рентгеноструктурному анализу, изучению механического двойникования природного кварца. В 1935 г. организируются работы по выращиванию кристаллов сахарозы, сегнетовой соли, а позднее — искусственных кварца и корунда. Одно из важных направлений деятельности сектора — продолжение работ по изготовлению кварцевых изделий в соответствии с заказами Наркомата обороны СССР.

Еще в Екатеринбурге в 1920—1924 гг., ведя преподавательскую и научную работу, Алексей Васильевич сформулировал для себя важный постулат: кристаллография как дисциплина имеет полное право на самостоятельную жизнь в науке в тесном взаимодействии с математикой, физикой, химией, минералогией и другими смежными разделами знаний. И на протяжении многих последующих лет Шубников настойчиво и не без огромных трудностей продвигался к своей мечте — освободить науку от «геологических пут», тормозивших ее развитие, и создать независимый Институт кристаллографии АН СССР.

К 1936 г. в кристаллографическом секторе Ломоносовского института работали уже пять лабораторий: кристаллизации из растворов, технокристаллография, кристаллизации из расплавов, кварца, конструкции и испытания новых механических приборов. В начале 1937 г. кристаллографический сектор был преобразован в отдел.

## Трудный 1937 год

Самым трудным периодом становления кристаллографии в СССР (как отдельной научной дисциплины, так и ее административного оформления) был 1937 г. Именно в этом году развернулась настоящая борьба за создание Института кристаллографии. Шубникову потребовались не только стойкость, мужество, но и отчаянная смелость в отстаивании своих идей и принципов.

Формально директором Ломоносовского института был Ферсман. Однако, по словам Вернадского, делами института он занимался мало. Обре-

менный большим количеством дополнительных должностей он, несмотря на это, сам работал очень интенсивно, принимая непосредственное участие в многочисленных геологических экспедициях и открывая новые месторождения полезных ископаемых, в которых так нуждалась наша страна. Из-за такой нагрузки Ферсман часто болел и нуждался в длительном лечении. Фактически же обязанности директора исполнял Д.И.Щербаков, с которым (как и с другими членами дирекции) у Шубникова давно были разногласия научного и научно-организационного плана. Да и его независимый характер не встречал одобрения со стороны руководства института. Одной из причин обострения отношений стало то, что кристаллографический отдел имел дополнительный доход. Сотрудники проводили договорные работы с некоторыми, не только академическими, учреждениями, а главное — велись важные исследования для обороны страны. Эти работы в отделе ставились на первое место. В протоколе заседания дирекции Ломоносовского института от 17 апреля 1937 г. говорится: «Признать имеющей особо важное народнохозяйственное значение тему по получению косых срезов кварца. Увеличить ранее отпущенные отделу кредиты в 37 000 рублей на 12 000 рублей, покрыв их в сумме 7 000 рублей из доходов Производственного Отдела и в сумме 5 000 рублей за счет сокращения кредитов остальных Отделов Института» [2, д.150, л.7]\*. Вряд ли инициатором такого решения была сама дирекция, но не дать согласия на эти работы она не могла, хотя такое привилегированное финансовое положение кристаллографического отдела не могло не раздражать руководство института.

Разногласия Шубникова с дирекцией до определенного времени не выходили из стен института, но в 1937 г. ситуация изменилась. Накал страстей достиг пика к июню. События, происходившие в это время, были необычайно важны и для Шубникова, и для развития кристаллографии как науки в нашей стране. Об этих подлинно драматических обстоятельствах следует рассказать максимально подробно. Борьба закончилась, к счастью, победой Алексея Васильевича. Он приблизился еще на одну ступень на пути создания Института кристаллографии.

1 июня 1937 г. дирекция Ломоносовского института подготовила проект приказа о реорганизации кристаллографического отдела. В первом параграфе этого документа предлагается: «...профессора А.В.Шубникова освободить от заведывания Кристаллографическим Отделом как не обеспечивающего развития Отдела в необходимых для Ломоносовского Института направлениях, вытекаю-

\* Большую помощь в работе с архивными материалами мне оказала заведующая читальным залом Архива Российской академии наук Ирина Георгиевна Тараканова, которой я искренне за это благодарна.

щих из поставленных им народно-хозяйственных задач» [3, л.83]. Алексея Васильевича предполагалось назначить руководителем новой лаборатории теоретической и экспериментальной кристаллографии со штатом четыре человека. При этом рентгеновскую лабораторию и лабораторию кварца предполагалось включить в состав минералогического отдела института. Таким образом, кристаллографический отдел, который создавал Шубников в течение стольких лет, практически полностью уничтожился. Проект приказа был составлен на основе обращения в Президиум АН СССР, отпущенного дирекцией института в тот же день.

11 июня Алексея Васильевича пригласили на заседание Президиума АН СССР. В повестке дня — вопрос «О Кристаллографическом Отделе Ломоносовского Института». Шубников не был предварительно ознакомлен ни с обращением дирекции в Президиум АН, ни с проектом приказа по институту. Лишь за несколько минут (!) до начала заседания и.о. директора Ломоносовского института Д.И.Щербаков передал ему текст обращения, которое должно обсуждаться на данном заседании.

Шубников оказался в труднейшем положении. В обращении перечислялись его многочисленные «грехи». Вот некоторые выдержки из этого документа [2, д.138, л.4, 4 об.].

*Дирекция Ломоносовского института Академии наук СССР доводит до сведения Президиума, что положение с Кристаллографическим Отделом Института продолжает оставаться ненормальным, несмотря на усиленное внимание, которое Дирекция уделяла этому отделу в течение последних трех месяцев. Основными моментами, препятствующими нормальной деятельности и дальнейшему развитию Кристаллографического Отдела в жизненно необходимых для всего Института направлениях являются, во-первых, продолжающееся резко враждебное отношение руководителя Отдела член-корр. АН профессора А.В.Шубникова к руководству Института как ученого и руководителя Отдела, не желающего содействовать развитию в Институте иных направлений кристаллографических работ, кроме тех, которыми он непосредственно руководит. В частности, мы имеем решительный отказ профессора Шубникова от организации в руководимом им Отделе кристаллохимического направления, т.е. той ветви кристаллографии, которая наряду с геохимией и в комплексе с ней открывает новые пути в понимании состава и происхождения*

*минералов и руд, использования новых видов минерального сырья, открывающего новые возможности синтеза минералов и стоит, таким образом, в теснейшей связи с геохимическими и минералогическими исследованиями Института. Исходя из всего этого, Дирекция ЛИГЕМ пришла к выводу, что единственным выходом из существующего положения является отстранение проф. А.В.Шубникова от заведывания Кристаллографическим Отделом.*

Обвинение было серьезным и в данном случае очень опасным. Пока в Архиве РАН не удалось найти стенограмму распорядительного заседания Президиума АН СССР от 11 июня 1937 г. Можно предположить, что Алексей Васильевич смог выступить на этом заседании, так как в его личном архиве хранится копия обращения, составленного им в тот же день. В нем Шубников предлагает поручить ему «как создателю кристаллографического отдела, руководившему им в течение 12 лет, составить докладную записку о положении кристаллографии в СССР и о дальнейших путях ее развития. Для рассмотрения этой записки созвать ученый совет из представителей дисциплин, заинтересованных в развитии кристаллографии. Окончательное решение о реорганизации кристаллографического отдела отложить до получения резолюции указанного совещания» [3, л.81, 81 об., 82].

Решение распорядительного заседания Президиума АН СССР от 11 июня 1937 г. было, вероятно, совершенно неожиданным для дирекции Ломоносовского института: «Поручить комиссии в составе академика В.Л.Комарова (Председатель), академика Г.М.Кржижановского и академика Н.П.Горбунова предварительно рассмотреть вопрос о Кристаллографическом Отделе Института геохимии,



Трудные годы. На этой фотографии Алексей Васильевич выглядит крайне подавленным. Кажется, нет больше сил бороться...

минералогии и кристаллографии и свои предложения представить на рассмотрение Президиума АН СССР» [4, д.9, л.205].

### «Гроссмейстерский ход»

Сколько времени было отпущено Шубникову до следующего заседания Президиума АН СССР, где будет решаться судьба кристаллографического отдела, предположить трудно. Но, вероятно, интуитивно он чувствовал, что надо действовать и действовать быстро. Через два дня, 13 июня, Алексей Васильевич отправляет свое обращение в Президиум АН СССР. Вот его текст [3, л.84, 85].

*Ознакомившись с заявлением Дирекции Ломоносовского Института от 1 июня и проектом приказа о реорганизации Кристаллографического Отдела, считаю нужным противопоставить этому проекту свой вариант.*

*1. Для всестороннего развития кристаллографии в СССР необходимо создать при Академии наук СССР отдельный институт.*

*Нахождение Кристаллографического Отдела в составе Ломоносовского Института не может обеспечить развития советской кристаллографии ввиду малого масштаба работ и необходимости вести работу только в направлении обслуживания нужд названного института; между тем жизнь требует от кристаллографии решения больших народно-хозяйственных задач, выходящих за пределы интересов минералогии и геохимии. Всем ясна та роль, которую должна играть кристаллография в химии, физико-химическом анализе, в металлургии и металлографии, в электротехнике, радиотехнике и телемеханике, в прикладной оптике, военном деле, абразивной промышленности, керамике и т.д., и т.д.*

*2. Институт должен объединить в себе всех виднейших кристаллографов, число которых в СССР ничтожно и может быть перечислено по пальцам... В Институт должны быть привлечены математики, занимающиеся проблемами кристаллографии... В него должны войти виднейшие физики, занимающиеся кристаллами... Совершенно необходимо включить в него физико-химиков... металловедов... и других специалистов по указанным выше предметам. Во главе научного руководства Института следует поставить кристаллографа. Наилучшим кандидатом я считаю проф. Болдырева, руководителя Кристаллографическим Отделом Фёдоровского Института. Для этого следует выбрать проф. Болдырева в академики.*

*3. Институт должен возглавить советскую кристаллографию и вывести ее на ту широкую дорогу, которая отвечает ее положению в науке и технике.*

*4. Институт должен добиться учреждения кафедр кристаллографии в ряде ВУЗов и прежде всего в Московском Университете.*

*5. Институт должен быть центром воспитания квалифицированных преподавателей кристаллографии в ВУЗах.*

Это был подлинно гроссмейстерский ход, но связанный с очень большим риском не только для его отдела, но и для жизни самого Алексея Васильевича. В стране продолжались аресты, в том числе и ученых. Примерно в это время в Харькове арестован и в ноябре расстрелян его племянник Лев Васильевич Шубников\*. Это был выдающийся молодой (36 лет) физик-экспериментатор, сделавший ряд блестящих открытий в области физики низких температур и магнетизма, признанных во всем мире. Среди них: эффект Шубникова—де Гааза, метод Обреимова—Шубникова (выращивания монокристаллов из расплава) и ряд других.

Одновременно с обращением в Президиум АН СССР Алексей Васильевич начинает искать среди ученых сторонников идеи создания независимого института. Он рассылает циркулярные письма известным ученым с просьбой высказать свое мнение по поводу этой идеи в надежде на поддержку научного сообщества [3, л.118—120]. И он ее получает. В Архиве РАН хранятся письма многих ученых с одобрением этой идеи. Среди них академик Н.Д.Зелинский, члены-корреспонденты АН СССР И.И.Черняев и П.А.Землячченский, профессора Л.М.Миропольский, С.В.Богомолов, И.И.Заславский, О.М.Аншелес, А.К.Болдырев, Б.В.Дерягин, Е.Е.Флинт и другие. Но главную поддержку Шубников получает от Вернадского. Именно его мнение впоследствии сыграло, вероятно, ключевую роль в решении Президиума АН СССР о создании в Академии самостоятельной лаборатории кристаллографии.

В своем письме от 6 июля 1937 г. Владимир Иванович не только одобрил идею создания независимого института кристаллографии, но и дополнил программу Шубникова рядом новых направлений кристаллографической науки в ближайшем будущем. Вернадский предвидел развитие кристаллографии как минимум на 50 лет вперед. Письмо представляет большой интерес и ранее, судя по всему, не публиковалось, поэтому его стоит привести полностью [3, л.51].

*Узкое. 6 VII [1]937 [г.]*

*Дорогой Алексей Васильевич,*

*Я определенный сторонник создания Кристаллографического Института отдельно от Минералогического и Геохимического. Не называл бы его кристаллологическим — т.к. это не есть уточнение мысли: уже давно в жизнь вошло понятие о кристаллографии, как науки о кристаллах — в самом широком ее понимании. В перечисленных Вами пяти пунктах отсутствует та*

\* О Л.В.Шубникове см.: Гредескул С.А., Пастур Л.А., Фейман Ю.А., Храмов Ю.А. Лев Васильевич Шубников // Природа. 1989. №1. С.89—97; о его научных работах см.: Френкель В.Я. Четырнадцать лет в жизни Л.В.Шубникова // Природа. 1991. №4. С.124—126.

черта, которая помещена в пункт б. Я считаю, что кристаллография должна изучать во всех отношениях не только искусственные кристаллы — но и естественные: как минералы, так и биохимические образования — например, такие особые тела, как белки, кристаллографически не изученные.

Для меня кристалл это векториально-развитая пространственная решетка и одна из форм твердого состояния материи. Твердое состояние, очевидно, тождественно с твердым химическим соединением, устойчивым в данном термодинамическом поле.

Мне кажется, у Вас в плане эта работа, которая мне сейчас представляется злобой дня в кристаллографии, не имеет места.

Поскольку отражаются эти явления в жидком и аморфном твердом состоянии, они должны найтись себе место в плане работ.

Сейчас в связи с вирусами и той путаницей, которая здесь происходит с пониманием кристалла, — эти вопросы должны быть особенно выдвинуты.

Фридель\* и другие едва затронули огромную область, и она сейчас есть вопрос дня.

Лично я считаю правильным — во всех отношениях — выдвинуть Вас как директора, а не Болдырева, которого я очень высоко ставлю.

Как раз в этих — мне кажется проблемах дня — А.К.[Болдырев] едва ли сможет поставить работы.

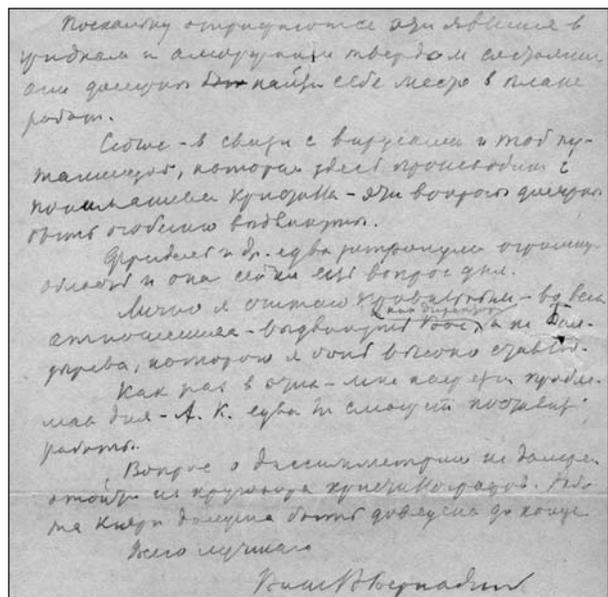
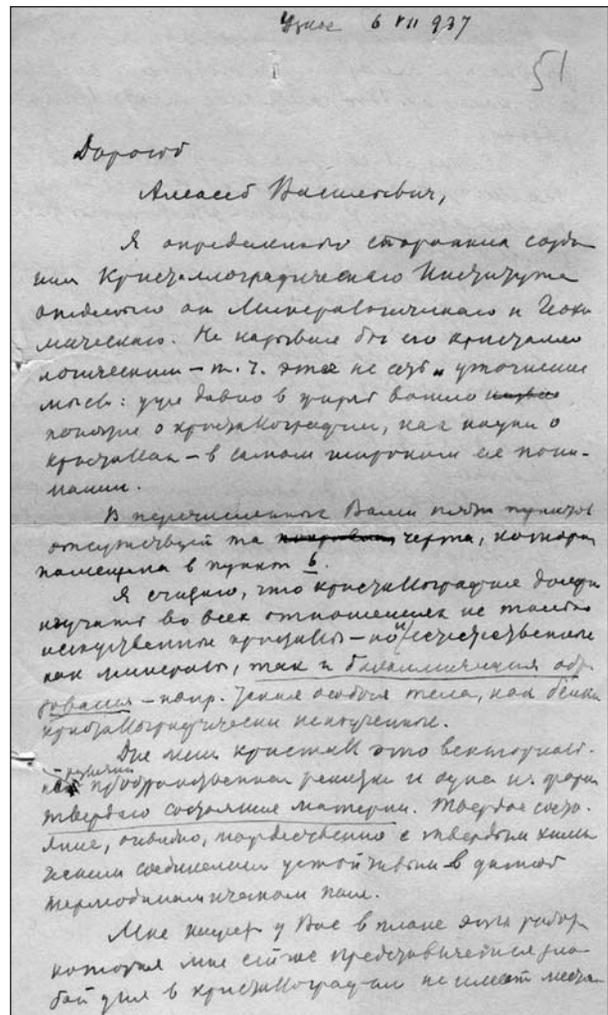
Вопрос о диссимметрии не должен отойти из кругозора кристаллографов. Работа Кюри\*\* должна быть доведена до конца.

Всего лучшего.

Ваш В.Вернадский

\* Жорж Фридель (1865—1933), сын известного французского химика-органика и минералога Ш.Фриделя (1832—1899), профессор и директор Школы горных инженеров в г.Сент-Этьене, крупнейший французский кристаллограф, один из основоположников науки о строении жидких кристаллов. Ввел понятие мезоморфная фаза для промежуточного состояния между формами природных кристаллов и неупорядоченным аморфным веществом. Дал общую классификацию конденсированных фаз вещества. Работал также в области описательной минералогии и в области теоретической и экспериментальной кристаллографии.

\*\* Пьер Кюри (1859—1906) — выдающийся французский ученый, лауреат Нобелевской премии по физике (1903), полученной совместно с М.Склодовской-Кюри и А.Беккерелем за открытие и исследование радиоактивности. Менее известны его ранние исследования по теоретической кристаллографии и физике кристаллов: открытие прямого пьезоэлектрического эффекта и экспериментальное подтверждение обратного (вместе с братом Жаком), а также зависимости намагниченности ряда кристаллов от температуры (закон Кюри). Кюри ввел понятие диссимметрии (отсутствия в объекте некоторых элементов симметрии). Работы по диссимметрии кристаллов были развиты Шубниковым и его учениками.



Письмо Вернадского Шубникову в поддержку создания Института кристаллографии: лицевая (вверху) и оборотная сторона [3, л.51]. Публикуется впервые.

В своем обращении к ученым Алексей Васильевич предлагает на пост директора будущего института не себя, а профессора Болдырева. Интересная деталь — большинство, положительно оценивая Болдырева как ученого, считают, что справиться с задачей организации института может только Шубников. Даже академик С.И.Вавилов, считавший идею создания Института кристаллографии нецелесообразной, написал в своем ответе Шубникову: «Профессора Болдырева я сам знаю плохо, и мое мнение никакой цены не имеет. Могу сказать только одно: думаю, без Вас из этого дела ничего не выйдет» [3, л.53, 54].

Знаменательной датой в судьбе советской кристаллографии следует считать 11 ноября 1937 г., когда состоялось распорядительное заседание Президиума АН СССР под председательством президента Комарова. Мы не знаем пока, сколько длилась и как проходила проверка деятельности кристаллографического отдела Ломоносовского института комиссией, образованной 11 июня 1937 г., но в протоколе указанного заседания Президиума АН СССР находим такую запись [4, д.8, л.125, 126].

*Заключение Группы Геологии о Кристаллографическом Отделе ЛИГЕМ. Докладчик — академик И.М.Губкин.*

1. Преобразовать Кристаллографический Отдел ЛИГЕМ в самостоятельную кристаллографическую лабораторию в составе Группы Геологии.

2. Предложить руководству лаборатории разработать и представить к следующему заседанию Президиума структуру, штаты и объем финансирования кристаллографической лаборатории.

15 ноября 1937 г. академик Комаров подписывает соответствующее постановление Президиума АН СССР. Однако вступление документа в силу откладывалось.

17 ноября 1937 г. Совет народных комиссаров СССР постановил «существующие три научно-исследовательских института — Геохимический им.Ломоносова, Петрографический и Геологический — объединить в один Геологический научно-исследовательский институт» [5, с.265]. Академик А.Д.Архангельский, назначенный временно исполняющим обязанности директора Института геологических наук АН СССР, был против постановления Президиума АН СССР о выделении кристаллографического отдела из своего института.

## И снова бой

4 декабря 1937 г. Шубников снова обращается в Президиум АН СССР с письмом, где он, как и прежде, очень четко и ясно объясняет необходимость создания лаборатории кристаллографии как отдельного академического учреждения. В этом обращении Шубников пишет следующее [3, л.99, 99 об.].

*Мне известно, что акад. Архангельский и ряд других представителей геологической группы высказываются против постановления Президиума Академии Наук о выделении Кристаллографического Сектора в самостоятельную единицу, обосновывая свою точку зрения тем, что вновь образуемый Геологический Институт неизбежно будет создавать свой кристаллографический отдел, так как ни минералогия, ни петрография, ни геохимия не могут развиваться без кристаллографии.*

*Всецело поддерживая мнение акад. Архангельского в отношении необходимости иметь кристаллографический кабинет для обслуживания нужд геологических наук, я должен категорически высказаться против отмены постановления Президиума Академии Наук по следующим причинам.*

*Хотя кристаллография и полезна для геологических наук, но эти последние оказывают весьма малое влияние на развитие современной научной кристаллографии. Именно этим обстоятельством и можно объяснить: 1) тот застой, который наблюдается в официальной кристаллографии, возглавляемой минералогами; 2) отсутствие кафедр кристаллографии в Московском университете; 3) почти полное отсутствие лиц, желающих специализироваться в области кристаллографии; 4) весьма низкий уровень научной подготовки преподавателей кристаллографии в вузах и 5) полное непонимание задач кристаллографии со стороны геологов, считающих себя достаточно компетентными решать судьбы кристаллографии в СССР без предварительного обсуждения этого вопроса в немногочисленной среде специалистов-кристаллографов. Я считаю нужным указать, что кристаллография по своим задачам ближе всего стоит к физике, химии и математике и что только теснейший контакт с этими тремя основными дисциплинами может обеспечить правильное всестороннее ее развитие. С другой стороны, я должен подчеркнуть, что кристаллография не может считаться частью физики, химии или математики, так как метод кристаллографии (симметрия) существенно отличается от методов перечисленных наук. Что касается геологических наук, то они по степени связи их с кристаллографией сравнимы с металлогией, радиотехникой, прикладной оптикой, оборонной техникой и т.д.*

*Мой личный двадцатипятилетний опыт научной работы в геологических учреждениях со всей очевидностью показал, что вести дальше работу в этом направлении является делом совершенно бессмысленным, так как наиболее интересные и важные вопросы кристаллографии, например вопросы, связанные с применением кварца для обороны, придется и впредь разрешать скорее вопреки, чем с помощью тех геологических учреждений, в которых должна развиваться кристаллография.*

*Я считаю безусловно необходимым выделение Кристаллографической лаборатории в самостоятельную научную единицу. Иначе мы не создадим ни специалистов кристаллографов, ни новой советской кристаллографии.*

Почему же, по мнению Шубникова, кристаллография имела право претендовать на независимость, как минимум, от геологических наук, хотя в то же время и была связана с ними? Ведь минералы — это одни из первых объектов исследования кристаллографов. Изучение свойств природного кварца позволило использовать его в качестве сырья для изготовления стабилизаторов радиочастот для нужд оборонной промышленности страны. В кристаллографическом отделе изготавливали также линзы и полусферы для микроскопов, так необходимых специалистам для изучения минералов, пород, металлов и т.д. Кроме того, производились опорные камни для ряда приборов. Но запасы природного высококачественного сырья — кварца — истощались. Нужно было искать ему замену, т.е. заниматься поиском путей выращивания искусственных кристаллов, изучением их физических свойств, атомной структуры. Это огромная и трудоемкая задача требовала, прежде всего, расширения физических и химических исследований, привлечения новых научных сотрудников. Нужно было срочно организовывать промышленное производство искусственных кристаллов, так необходимых стране.

Как удалось изменить ситуацию и все-таки создать независимую Лабораторию кристаллографии АН СССР, пока точно установить не представляется возможным. Но 15 апреля 1938 г. Шубников, исполняющий обязанности заведующего, выступил на заседании Президиума АН СССР с докладом о работе самостоятельной Лаборатории кристаллографии за 1937 г. Алексей Васильевич сделал блестящий доклад о работе нового учреждения, представив и обстоятельный план развития независимой лаборатории на последующие годы. Это было выступление будущего директора Института



Директор Института кристаллографии АН СССР А.В.Шубников в своем рабочем кабинете. Москва, 1950-е годы.

кристаллографии. В прениях по докладу положительную оценку ему дали многие известные ученые — академики А.Н.Фрумкин, В.И.Вернадский, Э.В.Брицке, Н.С.Курнаков, Н.Д.Зелинский, С.И.Вавилов. Подытожил эти выступления президент АН СССР академик В.Л.Комаров: «...у нас был академик Фёдоров, который формировал науку кристаллографию и был известен во всех странах света. И потеря работ по кристаллографии, конечно, является совершенно недопустимой. Мы сделали большую ошибку, когда мы растворили кристаллографию в других науках. <...> Вот поэтому я считал бы, что первым нашим постановлением должно быть постановление о сохранении кристаллографии как самостоятельной дисциплины — как для теоретических работ, так и для практического применения кристаллографических знаний» [6, л. 214—216].

Завершилось заседание Президиума такими словами Комарова: «Закончим вопрос, поставленный перед нами. Мы приветствуем работы Кристаллографической лаборатории, объявляем ей самостоятельное место в нашей системе...» [6, л.229]. Это была настоящая и заслуженная победа Алексея Васильевича Шубникова в его трудной борьбе и предпоследняя ступенька на долгом пути создания Института кристаллографии. ■

## Литература

1. *Sbchagina N.M.* Aleksei Vasilievich Shubnikov: Memories of the Man and his Scientific Achievements on the 125th Anniversary of his Birth // *Ferroelectrics*. 2012. V.437. P.1—7.
2. Архив РАН. Ф.413. Оп.1.
3. АРАН. Ф.1645. Оп.1. Д.165.
4. АРАН. Ф.2. Оп.6а.
5. Академия наук СССР в Решениях Политбюро ЦК РКП(б), ВКП(б) и ЦК КПСС, 1922—1952. М., 2000.
6. АРАН. Ф.2. Оп.3. Д.17.

# Минералогия в физическом институте



Р.К.Расцветаева

Как уже говорилось, Институт кристаллографии не всегда был физическим и даже институтом, а поначалу он был лишь Лабораторией кристаллографии. Объектами ее исследований служили минералы, и в первую очередь кварц, обладающий пьезоэлектрическими свойствами. А.В.Шубников, возглавлявший лабораторию, стал и первым директором созданного на ее базе в 1943 г. Института кристаллографии АН СССР (ИК АН, а затем ИК РАН). Новый институт приписали к Отделению физико-математических наук, но в нем сохранилась минералогическая тематика, занимавшая важное место среди развиваемых физических направлений. Минералогические исследования проводились под руководством академика Н.В.Белова (1891–1982) и были направлены на решение «народнохозяйственной проблемы освоения месторождений полезных ископаемых в Хибинах и ряде других регионов». Позже интерес к минералам сместился в сторону теоретических и методологических проблем решения их кристаллических структур. Говоря о *физическом* институте, я имею в виду не только его статус, но, главным образом, специфику исследований кристаллического вещества, в частности с помощью рентгеноструктурного анализа. Этот метод нацелен на изучение внутреннего



**Рамиза Кераровна Расцветаева**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Область научных интересов — структурная минералогия. Постоянный автор «Природы».

строения и объясняет свойства кристаллов их атомной структурой. Николай Васильевич был основателем структурной минералогии в Институте кристаллографии. Возглавляя лабораторию рентгеноструктурного анализа, он привлекал большое число аспирантов. В то время были исследованы структуры около 100 минералов, в основном силикатов, на основе которых разрабатывались принципы плотнейшей упаковки и кристаллохимической концепции строения неорганических соединений, создавались арсенал кремнекислородных радикалов, химико-структурная систематика силикатов и др. Эпоха Белова вмещала более полутора тысяч научных публикаций, в числе которых и знаменитые «Очерки по структурной минералогии», обобщающие весь накопленный материал [1].

Позже, в 80-х годах, лабораторию рентгеноструктурного анализа присоединили к лаборатории прецизионных структурных исследований, возглавляемой В.И.Симоновым и ориентированной на задачу прикладного материаловедения: установление связи состав—структура—свойства. Акцент минералогических работ сместился в сторону фундаментальных кристаллохимических исследований природных соединений, служащих прототипами микро- и мезопористых материалов. Выполненные решения нескольких десятков структур расширили представление о разнообразии минерального мира и кристаллическом состоянии материи в целом.

И хотя лаборатория рентгеноструктурного анализа снова поменяла свое название (ныне это лаборатория рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения, возглавляемая М.В.Ковальчуком), минералогическая группа и в настоящее время проводит систематические рентгеноструктурные исследования минералов из многих регионов мира.



Н.В.Белов на международной конференции у стенда А.П.Хомякова.

Фото из семейного архива Хомяковых

### От цеолитных минералов к микропористым материалам

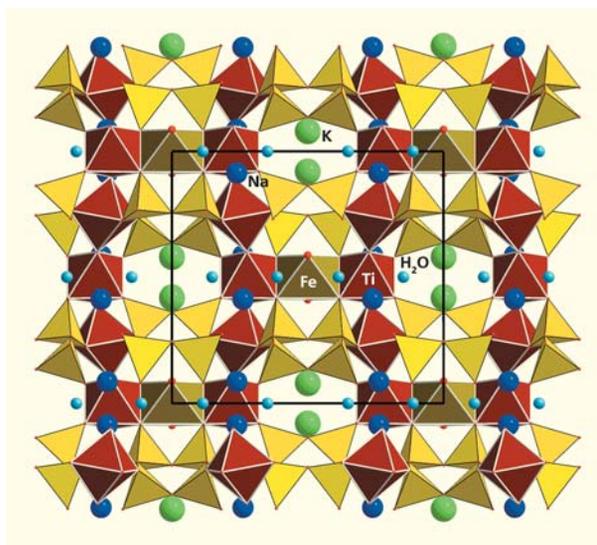
В последнее десятилетие кристаллохимия минералов интенсивно развивается. Это связано как с совершенствованием программного обеспечения, использованием синхротронного излучения и высокочувствительных CCD-детекторов, так и с ростом интереса к минералам как к прототипам материалов с разнообразными технологически важными свойствами. И в первую очередь исследователей интересуют цеолиты и цеолитоподобные минералы, в структурах которых имеется жесткий трехмерный каркас, а в полостях и каналах располагаются подвижные катионы и молекулы воды. Из 5000 известных сегодня минералов несколько сотен обладают цеолитоподобными структурами с каркасами смешанного типа, которые построены из тетраэдров при участии октаэдров переходных элементов — Ti, Nb, Zr, Fe, Mn, Zn и др. И лишь меньшая часть подобных минералов относится к собственно цеолитам в классическом понимании этого термина, т.е. каркасным алюмосиликатам. Цеолитоподобные минералы не только наиболее многочисленны, но и более разнообразны в химическом и структурном отношении.

В связи с поиском новых микропористых материалов ученые обратились к цеолитоподобным титано- и ниобосиликатам группы лабунцовита.

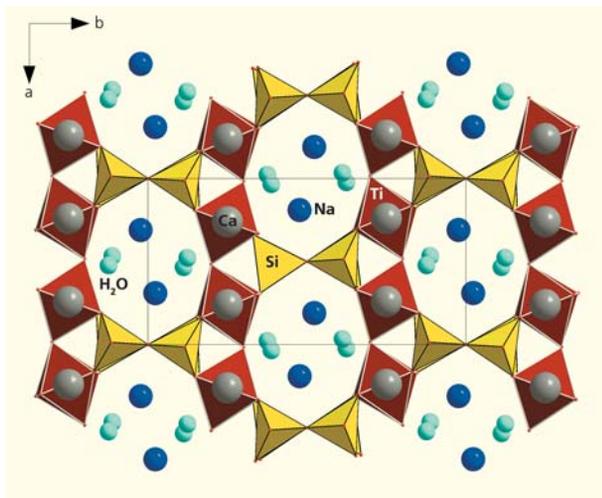
Их свойства обусловлены в первую очередь способностью обмениваться ионами с растворами, флюидами и расплавами. Выяснилось, что из растворов одни лабунцовиты лучше поглощают Na, K, Cs, а другие — Sr. И объяснение этому кроется в деталях их структуры, установленных рентгеноструктурным анализом.

В группу лабунцовита входят около 30 минеральных видов и разновидностей. Большая их часть изучена в ИК РАН [2]. В основе всех лабунцовитоподобных структур лежит каркас смешанного типа из бесконечных цепочек связанных вершинами *M*-октаэдров, занятых атомами титана или ниобия. Последние скреплены между собой в двух других направлениях кольцами  $[Si_4O_{12}]$ . В каналах каркаса располагаются крупные катионы щелочных и щелочноземельных металлов (Na, Ca, K, Ba), а также группировки  $H_2O$  и молекулы воды.

Нежесткое вершинное сочленение октаэдров в лабунцовитах делает возможным изменение степени деформации цепочек. Они сильно изогнуты в моноклинных минералах, а в ромбических (подгруппа ненадкевичита—коробицынита) — выпрямлены. В зависимости от строения цепочек меняются и свойства этих соединений. Некоторые моноклинные члены группы могут быть «сверхэффективными сепараторами» катионов. Наиболее яркий пример — структура алсахаровита-Zn, где ионы Na, Ca, Sr, K, Ba и Zn с хорошей селективностью занимают собственные позиции. И наоборот, при нормальных условиях ромбические члены группы лабунцовита в качестве внекаркасного катиона в основном содержат Na и как иониты считаются малоактивными [3].

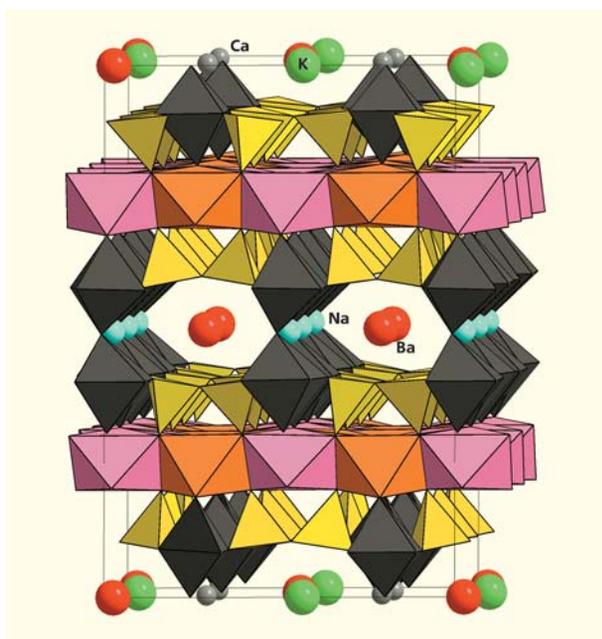


Смешанный каркас в структуре лабунцовитов. Колонки из связанных вершинами Ti-октаэдров объединяются четырехчленными кольцами  $SiO_4$ -тетраэдров и дополнительными Fe(Mn)-октаэдрами. Кружками показаны крупные катионы и молекулы воды в каналах каркаса.



Крупные каналы в структуре природного Са-коробицынита. Синие кружки — атомы Na, темно-серые — атомы Ca, голубые — молекулы воды.

Однако недавняя находка высококальциевого минерала в массиве Арис в Намибии показала, что на поздних стадиях эволюции щелочных комплексов кальций нередко обладает максимальной активностью, и замещение натрия на кальций в минерале с ромбической коробицынитовой структурой происходит на гидротермальной стадии в результате ионообменных процессов. Установленный нами упорядоченный изоморфизм Са и Na в новом минерале — доказательство и селективности структуры Са-коробицынита [4].



Микропористая структура сурхобита. *O*-слой из реберно-связанных октаэдров Fe и Mn и *H*-слой из Ti-октаэдров и Si-тетраэдров.

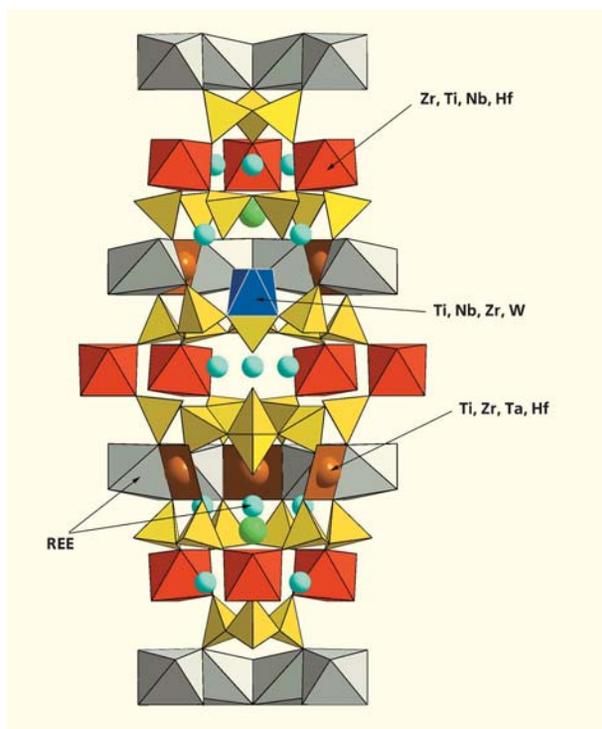
Цеолитные минералы с каркасами, содержащими атомы переходных элементов, отличаются значительным структурным разнообразием, что дает возможность получать микропористые материалы с широким диапазоном физических и химических свойств. Попытки создать такие материалы на основе смешанных каркасов были предприняты в 1996 г., когда в гидротермальных условиях синтезировались аналоги лабунцовита [5] и титаносиликатный материал ETS-4 [6]. Поскольку титановые колонки могут раздвигаться, наиболее перспективным оказался микропористый титаносиликат с широкими каналами ETS-10, полученный также в гидротермальных условиях ( $T = 200\text{--}220^\circ\text{C}$ ,  $pH \approx 10.5$ ) из смеси  $TiO_2$  (рутил, анатаз) с силикагелем, при молярном отношении  $Si : Ti = 5\text{--}6$  [7]. Примечательно, что в патенте (№9958243, Великобритания) в качестве сорбентов катионов некоторых радиоактивных изотопов (Cs, Sr, Co) наряду с микропористыми титаносиликатами ETS-10 и ETS-4 указан и ромбический ненадкевичит.

Внимание ученых привлекает также семейство широко распространенных в природе слоистых титано-, ниобо- и цирконосиликатов, структура которых состоит из трехслойных *H—O—H*-пакетов (*H* — гетеро, *O* — октаэдр). Между пакетами располагаются крупные катионы — Na, Ca, Sr, K, Ba [8]. Один из представителей данного семейства — сурхобит из щелочного массива Дарай-Пиёз (Таджикистан). В этом минерале *H—O—H*-пакеты соединены друг с другом в каркас, благодаря чему вдоль двух направлений формируются изолированные каналы разной ширины. Крупные катионы в них распределены упорядоченно: атомы Ca занимают позиции в одном узком канале, а Na — в другом. Атомы Ba заполняют один широкий канал, а K — другой. Кристаллохимическая избирательность делает этот тип структур природными сепараторами и ионообменниками.

Цеолитоподобные минералы за счет своей кристаллохимической избирательности служат также геохимическими индикаторами. Они помогают и в реконструкции миграционных процессов химических элементов в земной коре.

### Минералы — концентраторы полезных элементов

К цеолитоподобным соединениям относятся также минералы группы эвдиалита — тригональные кольцевые цирконосиликаты со сложным и изменчивым составом. Эта группа с химической и структурной точек зрения — одна из самых сложных в минеральном мире. Идеализированная формула эвдиалита выглядит достаточно простой:  $Na_{15}Ca_6Fe_3Zr_3Si_{26}O_{72}(O,OH)_2Cl_2$ . Но это впечатление обманчиво. Без преувеличения можно сказать, что в нем содержится треть таблицы Менделеева. Природные процессы ионного обмена



Смешанный каркас эвдиалита из трех- и девятичленных кремнекислородных колец, объединенных между собой Zr-октаэдрами и шестичленными кольцами Ca-октаэдров. В полостях каркаса находятся крупные катионы, ионы оксония и молекулы воды. Стрелками показаны позиции, в которых концентрируются редкие и редкоземельные элементы.

и выщелачивания катионов, протекающие в эвдиалитах без разрушения кристаллической структуры, наблюдаются при замещении Na на K, Ca и  $H_3O^+$ . В случае значительных скоплений эти минералы представляют собой и самостоятельный практический интерес. В массивах Ловозера и Илимусака эвдиалит формирует гигантские месторождения с запасами в миллионы тонн.

Минералы этой группы обладают способностью концентрировать целый ряд редких элементов. Наряду с обычными элементами (Si, Na, Ca, Mn, Fe и др.) в их структуру входят и полезные компоненты — Zr, Ti, Nb, Hf, Ta, W, REE, однако их извлечение — задача непростая. До последнего времени ее не слишком успешно пытались решать технологическими методами — тотальным разложением эвдиалитов неорганическими кислотами. При таком подходе кремний переходит в раствор в виде поликремниевых кислот, образующих фильтруемые гели, что затрудняет процессы выделения и очистки ценных компонентов. Сегодня разрабатываются новые технологические приемы селективного извлечения полезных компонентов из эвдиалита. Один из них — сольватометаллургический способ выделения из механически активированного минерала без разрушения его структуры [9]. Рас-

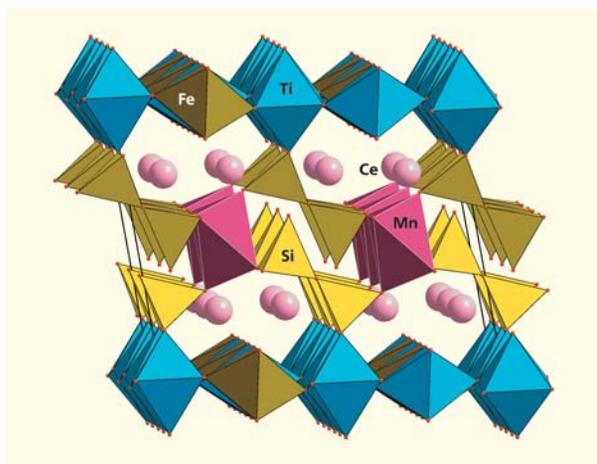
сматривается также и возможность использовать декатионированные формы для внедрения и удержания в них вредных для человека элементов.

Рентгеноструктурный анализ минералов группы эвдиалита и их разновидностей дает необходимую информацию для разработки оптимальных технологий, основанных на кристаллохимическом подходе.

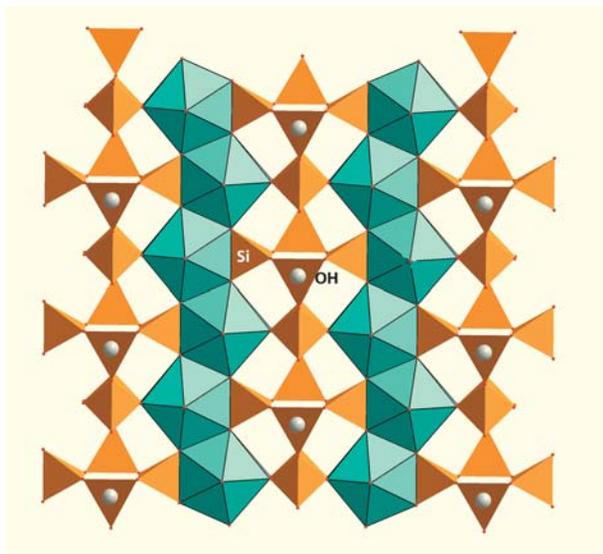
Эвдиалит вовлекает в свою структуру почти все химические элементы, присутствующие в минералообразующей среде, что приводит к огромному структурному разнообразию и широкому диапазону физических и химических свойств у представителей этого семейства. Исследования десятков эвдиалитоподобных минералов выполнены в основном в Институте кристаллографии [10, 11].

Еще одним примером могут служить недавно изученные нами минералы группы чевкинита — концентраторы титана и сепараторы редкоземельных элементов. Эта группа объединяет моноклинные силикаты с общей кристаллохимической формулой  $ABM(Si_2O_7)_2O_8$ , где  $A$  и  $B$  —  $REE^{3+}$ , Sr, Ca;  $M$  — Ti,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Zr,  $Cr^{3+}$ , Mg, Nb, Mn, Al. В каналах смешанного каркаса структуры, состоящей из октаэдров Ti и Fe и диортогрупп  $Si_2O_7$ , находятся крупные катионы  $A$  и  $B$ . В их числе и атомы REE. Во всех описанных до настоящего времени образцах над другими лантаноидами преобладает церий. Реже встречаются La-доминантные представители. В эффузивных породах вулканического района Айфель (Германия) был обнаружен La-доминантный аналог перрьерита-(Ce) — перрьерит-(La). Стало возможным детальное исследование этого минерала, включая определение его кристаллической структуры. Еще один минерал — христофшферит-(Ce) — новый член группы чевкинита. Он также найден в вулканическом районе Айфель близ Лаахерского озера.

Мы установили, что структурных различий, которые могли бы привести к закономерному обога-



Структура христофшферита-(Ce). Шарами показаны атомы Ce в каналах каркаса.



Структура хейвиита. Колонки из U-пентагональных бипирамид объединены кремнекислородными лентами Si-тетраэдров.

щению первого минерала  $\text{La}^{3+}$ , обладающего наибольшим среди *REE* ионным радиусом, нет. Направляется вывод, что для минералов группы чевкита ведущую роль в формировании соотношений *REE* с разными ионными радиусами играет не кристаллохимическая избирательность, а внешние факторы. Фракционирование *REE* в двух изученных нами минералах можно объяснить их крайней чувствительностью к изменениям флюидного режима, а их кристаллохимические особенности напрямую связаны с физико-химическими характеристиками минералообразующей среды. Эти минералы обладают рядом полезных свойств, включая сорбционные, и могут быть природными концентраторами редких элементов.

Нельзя не упомянуть исследование большой группы урановых минералов из Южного Казахстана, Забайкалья и Бразилии, которое внесло немалый вклад в попытки понять генезис урановых месторождений и эволюцию захоронений вредных для человека радиоактивных отходов и продуктов их распада (Pb, Cs, Sr и Mo).

Строение урансодержащих минералов необходимо учитывать также при поиске оптимальных технологий регенерации и хранения отходов ядерной промышленности. Однако рентгеноструктурное исследование этих минералов затруднено из-за сильного поглощения рентгеновского излучения их кристаллами и частичного радиационного повреждения. Особенно сложной задачей оказалась расшифровка структуры хейвиита  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2[\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})_2] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  из Бразилии. Дифракционная картина от кристаллов была крайне бедна, и мы смогли найти лишь модель структуры с новым типом кремнекислородной ленты, которую недавно подтвердили чешские ученые.

## Открытие новых минеральных видов

Поиск минералов — прототипов синтетических материалов — часто сопровождается открытием новых видов. Это направление, обычно считающееся побочным продуктом научной деятельности, все больше доминирует в работе с природными соединениями. До 1800 г. было известно менее 100 самостоятельных минеральных видов, а в дальнейшем число открываемых ежегодно новых минералов неуклонно растет (в среднем оно увеличилось с 20 до 60). Это связано, с одной стороны, с интенсивным освоением территорий, а с другой — с развитием техники и увеличением разрешающей способности приборов.

Успешному открытию минералов в ИК РАН способствовали создание Центра коллективного пользования, оснащенного новейшими дифрактометрическими приборами, а также тесное сотрудничество с высокими профессионалами, мировыми лидерами в обнаружении новых минералов, — Н.В.Чукановым и А.П.Хомяковым. Находить в природе новые минералы может далеко не каждый. Этот большой и кропотливый труд начинается с полевых работ, когда собирается коллекция образцов, для которых в дальнейшем выполняется широкий комплекс детальных исследований — от определения состава и свойств до расшифровки кристаллической структуры. Важное участие здесь принимают и специалисты в области рентгеноструктурного анализа. Подробное описание всех этапов «рождения» нового минерала — от его находки до утверждения Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (КНМНК ММА) — можно найти и на страницах «Природы» [12].

На протяжении последних 25 лет сотрудники ИК РАН участвовали в открытии 67 утвержденных КНМНК ММА минеральных видов. В статье А.Г.Булаха с соавторами приведена 71 фамилия ученых из разных стран мира (России, Италии, Канады, США и др.), открывших в 2000—2010 гг. наибольшее число минералов (причем в список включались исследователи, на долю которых приходится не менее одного минерала в год) [13]. В этом списке я занимаю достойное восьмое место за открытие 36 минералов, а значит, наш институт входит в первую десятку институтов-первооткрывателей.

Новые минеральные виды расширяют представление о формах кристаллизации вещества и пополняют арсенал кремнекислородных и других строительных фрагментов. Среди них (открытых при нашем участии) — мегациклит с уникальным кольцом из 18 (!) кремнекислородных тетраэдров; грумантист с новым типом «разорванного» каркаса; ершовит с амфиболовыми блоками, расположенными не в шахматном порядке, а параллельно друг другу; буссенит — карбонат-содержа-

щая титаносиликатная слюда; ташелгит со ступенчатыми слоями; коробицынит — титановый аналог ниобиевого ненадквечита; лабунцовитоподобные минералы — лемлейнит, нескеварит, алсахаровит и многие другие.

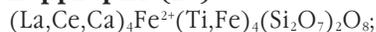
Особенно интересны минералы группы эвдиалита, по мнению некоторых исследователей, представляющие собой новый тип гигантских молекулярных структур в минеральном мире — переходный к полимерным кристаллам. Большая часть из 70 членов этого семейства изучена структурщиками из ИК РАН. По результатам наших исследований были открыты: высокониобиевый георгбарсановит с ярко выраженным пьезоэффектом (из Хибинского массива на Кольском п-ове); высокомарганцевый манганоевдиалит (из Бразилии); высоководный аквалит (из Инаглинского массива в Саха-Якутии); высококалийевый андриановит (из Хибинского массива); высококальциевые фекличевит, его карбонатный аналог голышевит и гиперкальциевый моговидит (из Ковдорского массива на Кольском п-ове); оксониевый икранит, низкокальциевые и низкосимметричные раслакит и воронковит (из Ловозерского массива на Кольском п-ове) и др. Недавно этот список пополнился высококалийевым псевдоцентросимметричным давинчиитом, названным в честь Леонардо да Винчи. Особенно сложны модулярные эвдиалиты с удвоенной ячейкой ( $c \sim 60-61 \text{ \AA}$ ) и высокоупорядоченными 24-слойными структурами — уникальными представителями минерального мира. Изучено 13 таких мегаэвдиалитов из Хибино-Ловозерского комплекса. Четыре из них утверждены в качестве новых минеральных видов: титановый аллуйвит, титано-циркониевый дуалит, высококалийевый расцветаевит, а также высоконатриевый лабиринтит с низкосимметричной ( $R3$ ) элементарной ячейкой, в которой свыше 100 позиций содержат 800 катионов. Открытие и исследование мегаэвдиалитов в ИК РАН — пионерные, они до сих пор не имеют аналогов за рубежом.

Только за последние два года сотрудники нашего института открыли семь минералов:

**шюллерит** —



**перрьерит-(La)** —



**лилейит** —



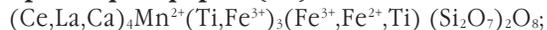
**осумилит-(Mg)** —



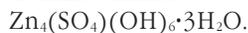
**давинчиит** —



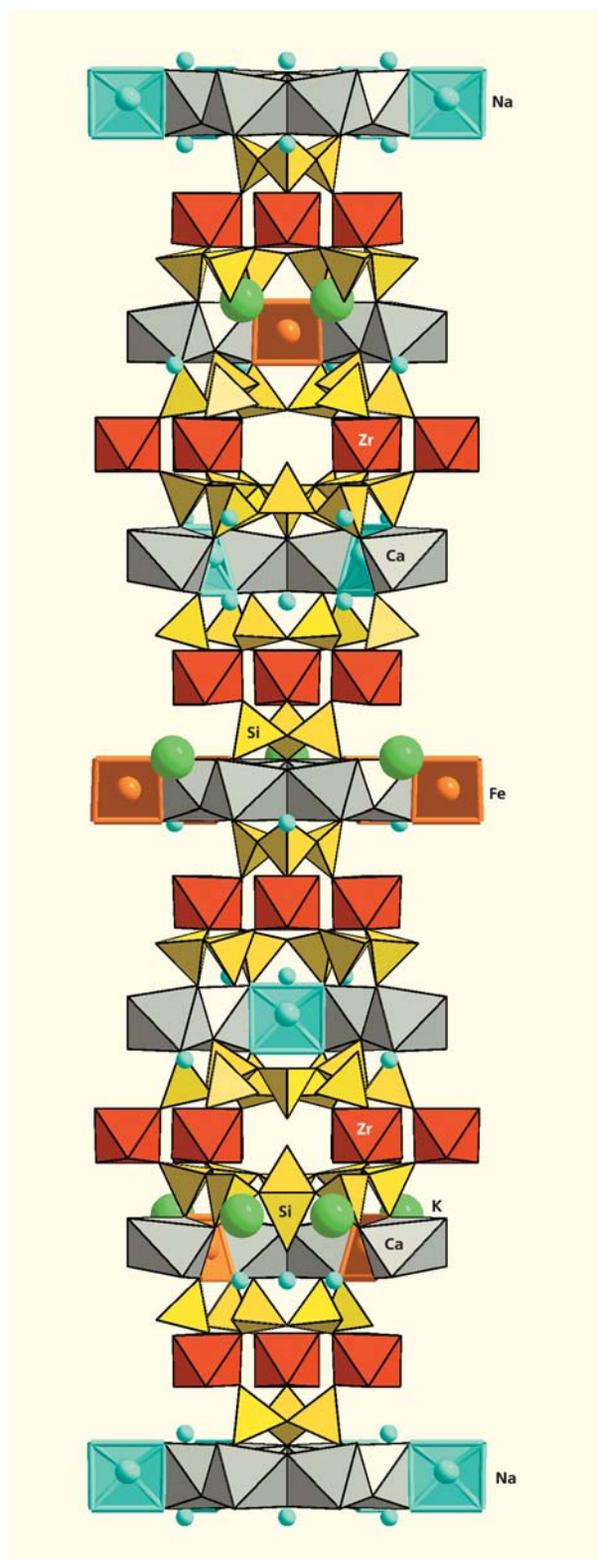
**христофшферит-(Ce)** —



**ланштайнит** —



Большой удачей для нас стала находка в базальтовом карьере горы Ротер Кофф в Германии

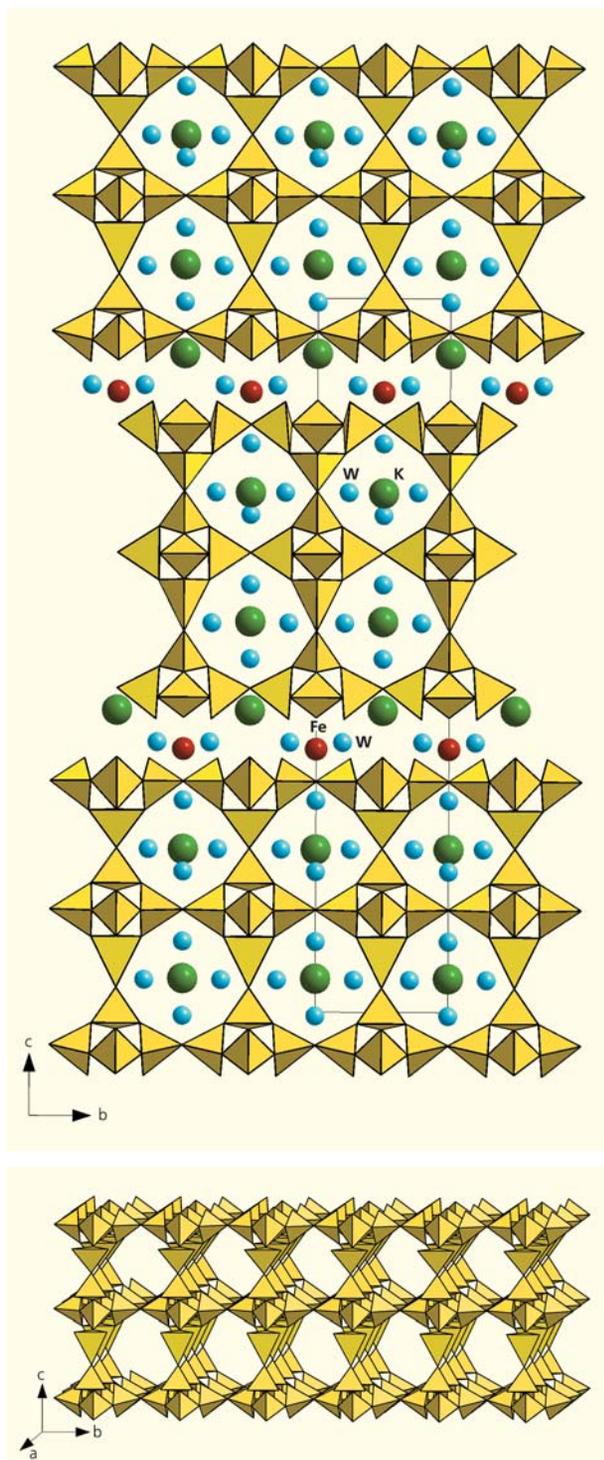


Структура расцветаевита. Каркас составлен из трехчленных колец  $[\text{Si}_3\text{O}_9]$ , шестичленных колец  $[\text{CaO}_6]$ -октаэдров и дисковидных радикалов  $[\text{Si}_{10}\text{O}_{28}]$ . В ячейке вдоль параметра  $c = 61 \text{ \AA}$  чередуются атомы Na в квадратной координации (голубые квадраты) с атомами  $\text{Fe}^{2+}$  в той же координации (черные квадраты).

нового микропористого цеолитоподобного минерала гюнтерблассита



утвержденного 2 июня 2011 г. Об истории его открытия я уже рассказывала читателям «Природы»



Структура гюнтерблассита. Внизу — тройной тетраэдрический слой.

[14]. Структура этого силиката состоит из трехслойных тетраэдрических кремнекислородных пакетов, встреченных в природных соединениях впервые. Можно с уверенностью прогнозировать, что трехслойный пакет  $[Si_{13}O_{29}]$  при дальнейшем наращивании слойности перейдет в каркас, и гюнтерблассит, таким образом, можно считать недостающим звеном в ряду однослойный маунтинит — двуслойный родезит — трехслойный гюнтерблассит — гипотетический каркасный алюмосиликат.

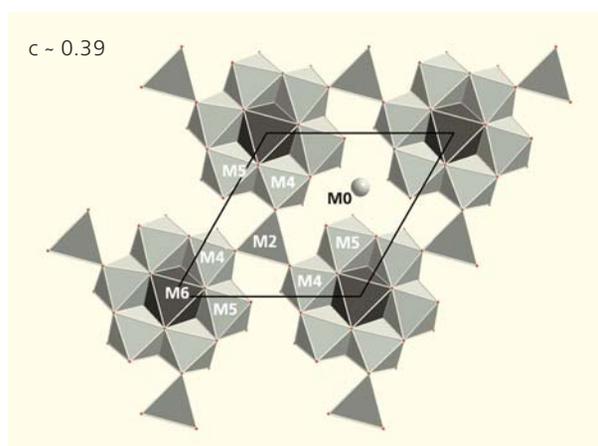
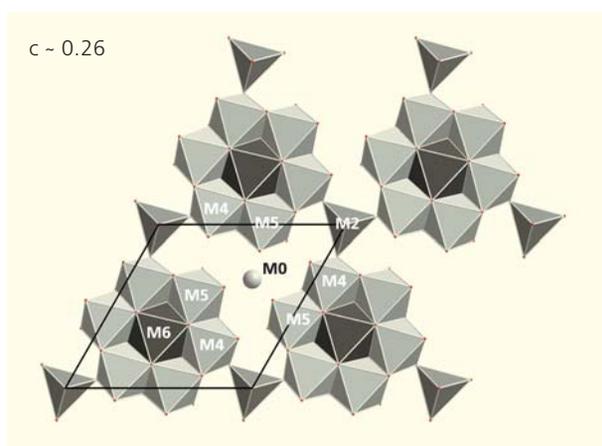
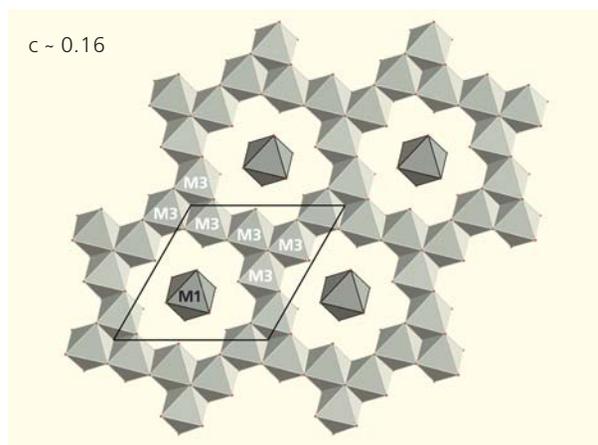
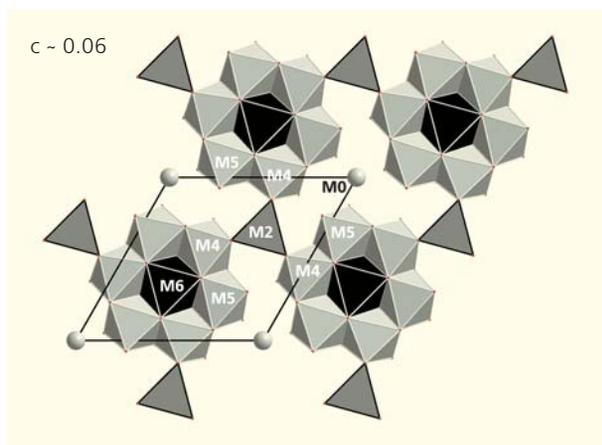
### Почему рентгеноструктурный анализ?

Всего насчитывается около 5000 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. Может оказаться, что при схожести внешнего вида (а иногда и химического состава) минералы будут различаться изнутри. И тогда ученые отнесут их к одной группе, но назовут разными именами.

Процесс открытия минерала связан с углубленным изучением внутреннего строения, так как его индивидуальность основана на принципе доминантности компонентов в отдельных неэквивалентных позициях кристаллической структуры. Через исследование атомной структуры открывается сегодня большая часть новых видов [12].

Не все минералы, прошедшие через сито монокристалльного рентгеноструктурного анализа, становятся новыми. Особенный элемент должен сконцентрироваться в отдельной позиции или преобладать там над другими элементами. В противном случае, если он не «упорядочился», а «размазался» по нескольким позициям, то независимо от его содержания потенциально новое соединение не реализуется в качестве нового минерала. Для утверждения минерального вида необходимо провести рентгеноструктурный и кристаллохимический анализы. Без этих данных сегодня минералы комиссией не рассматриваются.

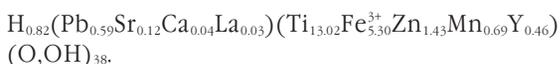
Метод монокристалльного рентгеноструктурного анализа требует кропотливого труда и больших временных затрат. Распределение катионов по структурным позициям — основная задача такого анализа и основная проблема для успешного утверждения минерала в качестве нового вида. Решение данной задачи можно продемонстрировать на примере альмейдаита, найденного в месторождении Бразилии и недавно утвержденного КНМНК МА по результатам нашего исследования. Минерал относится к группе кричтонита, кристаллизующегося в ромбоэдрической симметрии (пространственная группа  $R\bar{3}$ ). Топологически структура нового минерала аналогична структуре других членов группы. Ее основа — каркас из анионной плотнейшей упаковки, в котором можно выделить девять слоев, чередующихся вдоль длинной



Слоистые фрагменты структуры альмейдаита на уровнях от 0.06 до 0.49 вдоль оси 3-го порядка.

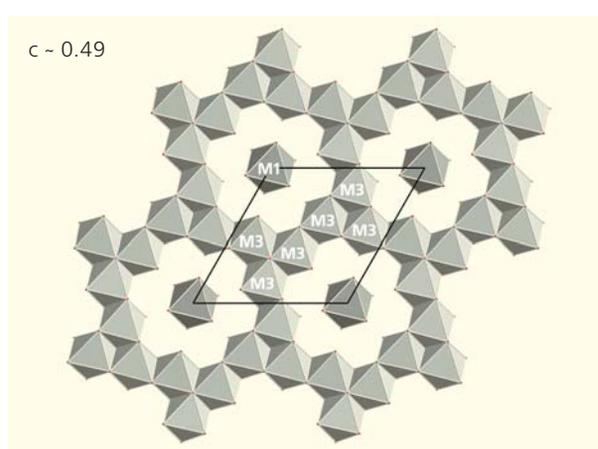
оси  $c \sim 21 \text{ \AA}$  в последовательности  $cbhcbh...$  В каждом слое октаэдры сочленяются ребрами и объединяются тетраэдрами. Катионы распределяются по шести структурным позициям, а индивидуальность минералов определяется катионами, доминирующими в этих позициях.

В составе нового минерала установлено повышенное содержание цинка. Его химическая формула определена на основе данных локального рентгеноспектрального анализа:



Задача распределения катионов в позициях на разных этажах структуры поначалу казалась неразрешимой, поскольку осложнялась тем, что большинство катионов близки по размерам и атомному весу. Кроме того, они заселяют свои позиции не полностью, а лишь частично. К тому же расстояния катион—анион в октаэдрах изменяются всего от 2.0 до 2.2  $\text{\AA}$  и не могут служить подсказкой при распределении атомов.

С первой позицией никаких проблем не возникло. Ее занимали крупные катионы Pb и Sr со

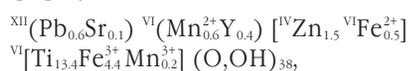


средними расстояниями  $M-O = 2.84 \text{ \AA}$ . Наиболее мелкий Zn также однозначно входил в  $M2$ -тетраэдр с наименьшим средним расстоянием  $\text{Zn}-O = 1.95 \text{ \AA}$ . Однако вблизи (1.26  $\text{\AA}$ ) от  $M2$ -тетраэдра возникла дополнительная седьмая позиция, занятая небольшим количеством  $\text{Fe}^{2+}$  со средним расстоянием  $\text{Fe}-O = 2.1 \text{ \AA}$ . Это привело к статистическому заполнению обеих позиций атомами  $\text{Fe}^{2+}$  и Zn.

В октаэдрах  $M3-M5$  группировались катионы с близкими ионными радиусами:  $r\text{Fe}^{3+} = 0.55$

и  $r\text{Ti}^{4+} = 0.605 \text{ \AA}$ . С учетом того, что атом Ti, как правило, смещается из центра октаэдра к одной из апикальных вершин, мы разместили его в позициях *M4* и *M5* с расстояниями катион—анион 1.87—2.2 и 1.88—2.1 Å соответственно. Наиболее крупные из оставшихся октаэдрических катионов Mn<sup>3+</sup> ( $r\text{Mn} = 0.67 \text{ \AA}$ ) и Y ( $r\text{Y} = 0.9 \text{ \AA}$ ) располагаются в *M1*-полиэдре с максимальным средним расстоянием 2.2 Å. Позиция *M3* с более равномерным распределением связей центрального атома с кислородом и средним расстоянием катион—анион 2.0 Å занята, главным образом, Fe с примесью оставшихся атомов титана и небольшого количества трехвалентного марганца.

Главные особенности состава и структуры альмейдаита отражены в его кристаллохимической формуле:



где римскими цифрами обозначены координационные числа катионов.

По итогам рентгеноструктурных и кристаллохимических исследований модель структуры согласована по химическому составу, тепловым параметрам атомов, межатомным расстояниям и валентностям на анионах. Ее достоверность подтверждена достаточно низким значением *R*-фактора.

Следующим шагом была интерпретация индивидуальности соединения среди остальных членов группы. Ведь цинк присутствует в тетраэдрической позиции *M2* в нескольких минералах, в том числе и в сенаите (но вместе с железом при доминировании последнего). А вот в ландауите цинк занимает позицию единолично. Сходство альмейдаита с ландауитом прослеживается и в составе остальных позиций, за исключением одной — крупнокатионной. Ее в ландауите занимает натрий (при участии атомов свинца), а в альмейдаите — преимущественно свинец (с примесью стронция).

Исследование минералов методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа требует не только достаточно хорошей теоретической подготовки, но и большого опыта работы со структурами сложных природных объектов. Минералогическая тематика в ИК РАН привлекает студентов и аспирантов из Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова и других вузов страны. Только за последние 15 лет прошли обучение в нашем институте и успешно защитили кандидатские диссертации шесть аспирантов.

Немалую роль в привлечении внимания к структурной минералогии и кристаллохимии играет и популяризация достижений в этой области знаний. Научно-популярные работы по кристаллохимии минералов охватывают 40 публикаций в журналах «Природа» и «Тиетта», различных сборниках и книгах [15].

Эти работы регулярно участвовали в конкурсах на лучшую научно-популярную статью по наукам о Земле, проводимых Российским фондом фундаментальных исследований, и неоднократно отмечались премиями (2002, 2004, 2006, 2007—2011).

## Вместо послесловия

В этом кратком обзоре я не ставила целью описать все минералы. Мне на примере нескольких исследований, проведенных нами за последние 20—25 лет, хотелось показать круг задач и объектов наших работ.

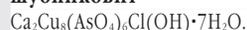
Отдавая должное заслугам Института кристаллографии в развитии минералогии, ученые назвали восемь минералов именами его сотрудников, а один из них — в честь самого Института (таблица). Волнующие истории их открытия я уже описывала в статье «Фамильные минералы нашего Института» [16].

В честь выдающегося кристаллографа академика Шубникова (1887—1970), имя которого с 1971 г. носит ИК РАН, назван водный арсенат меди и кальция **шубниковит**. Имя выдающегося кристаллохимика академика Белова (1891—1982) носит минерал из группы апатита **беловит**. **Леммлейнит** из группы лабунцовита назван в честь Г.Г.Леммлейна, известного российского минеролога и кристаллографа (1901—1962); **стишовит** — в честь академика С.М.Стишова; **делонейт** — в честь выдающегося российского математика-геометра Б.Н.Делоне (1890—1980); **расцветаевит** — в честь автора этих заметок; **андриановит** — в честь А.В.Андрианова (1938—1991), известного российского математика, создателя системы кристаллографических программ для структурного исследования минералов с большим числом атомных по-

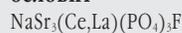
### Таблица

#### Фамильные минералы ИК РАН

##### шубниковит



##### беловит



##### Леммлейнит



##### стишовит



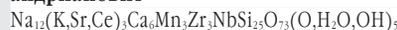
##### делонейт



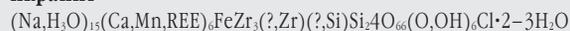
##### расцветаевит



##### андриановит

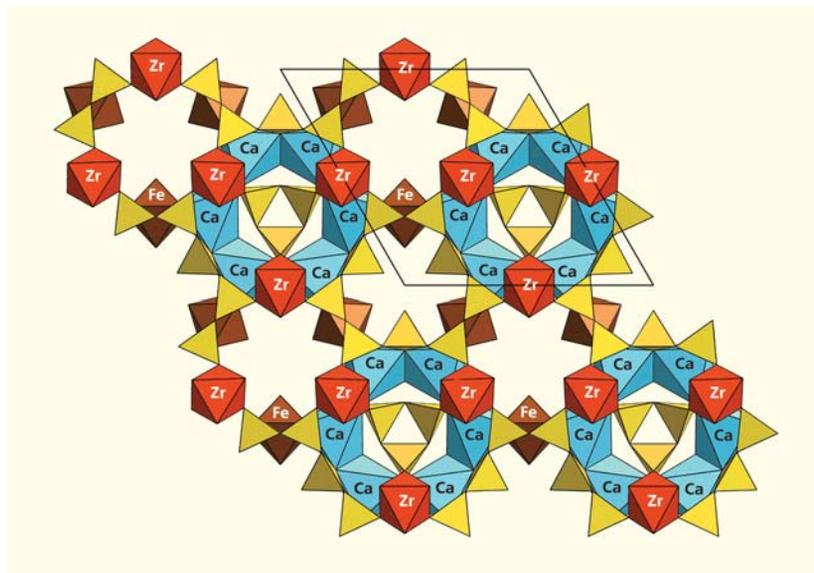


##### икранит



зиций переменного состава. И наконец, **икранит**, который носит имя Института кристаллографии РАН. Минерал получил свое название в канун 60-летия ИК РАН. Это знаменательное и крайне редкое событие, когда новому природному соединению присваивается имя института (а тем более физического!), по счастливому стечению обстоятельств произошло третьего числа третьего месяца третьего года третьего тысячелетия, т.е. 3 марта 2003 года.

Сегодня (как, впрочем, и 20 лет назад) в нашей стране принято делить науку на ту, которая «кормит», и на «чистые» исследования, которые нельзя продать. К разряду неприбыльных занятий относится и открытие минеральных видов. Вы не можете заставить купить новый минерал (это ведь не драгоценный камень!) ни частное лицо, ни государственное учреждение. Те, кто открывает минералы, и те, чьи имена присваиваются новым видам, не имеют никакой выгоды, кроме морального удовлетворения. Наверное, поэтому открывателей-энтузиастов считанные единицы.



Структура икранита. Три типа колец — трех- и девятичленные из тетраэдров кремния и шестичленные из октаэдров кальция — объединены изолированными Zr-октаэдрами.

Можно по-разному относиться к открытию новых минералов, но нельзя упускать из виду, что эта деятельность позволяет выявить много уникальных структур, не имеющих аналогов среди синтетических соединений. А кто может сказать, какие из этих знаний пригодятся нам завтра? ■

## Литература

1. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М., 1976.
2. Чуканов Н.В., Пеков И.В., Задов А.Е. и др. Минералы группы лабунцовита. М., 2003.
3. Чуканов Н.В., Пеков И.В., Расцветаева Р.К. Кристаллохимия, свойства и получение микропористых материалов, содержащих переходные элементы // Успехи химии. 2004. Т.73. №3. С.227–246.
4. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М., Чуканов Н.В., Трёммель Г. Кристаллическая структура нового минерала группы лабунцовита — Ca,Na-упорядоченного аналога коробицынита // Докл. АН. 2013. Т.452. №5. С.525–528.
5. Rocha J., Brandao P., Lin Z. et al. Novel microporous titanium–niobium–silicates with the structure of nenadkevichite // Chem. Commun. 1996. №5. P.669–670.
6. Philippou A., Anderson M.V. Structural investigation of ETS-4 Zeolites // Zeolites. 1996. V.16. P.98–100.
7. Rocha J., Ferreira A., Lin Z., Anderson M.V. Synthesis of microporous titanosilicate ETS-10 from  $TiCl_3$  and  $TiO_2$ : a comprehensive study // Microporous Mesoporous Mater. 1998. V.23. P.253–255.
8. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М. Кристаллохимия силикатов с трехслойными ТОГ- и НОН-модулями слоистого, ленточного и смешанного типа. Обзор // Кристаллография. 2011. Т.56. №6. С.975–1000.
9. Чекмарев А.М., Чижевская С.В., Бучихин Е.П. Сольвометаллургия — новое направление металлургии в XXI веке // Хим. технология. 2000. №10. С.2–7.
10. Расцветаева Р.К. Структурная минералогия группы эвдиалита // Кристаллография. 2007. Т.52. №1. С.50–67.
11. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород, 2012.
12. Расцветаева Р.К. Как открыть новый минерал // Природа. 2006. №5. С.31–38.
13. Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Кривовичев С.В. Открытие новых минералов в 2000–2010 гг.: статистика, сущность, лидеры // ЗРМО. 2012. №2. С.32–41.
14. Расцветаева Р.К. Родезит или гюнтерблассит? // Природа. 2012. №3. С.46–49.
15. Расцветаева Р.К. Сказки о минералах. Нижний Новгород, 2008.
16. Расцветаева Р.К. Фамильные минералы нашего института // Природа. 2003. №11. С.35–40.

# Что видит атомно-силовой микроскоп?



А.Л.Толстихина, К.Л.Сорокина, Н.В.Белугина, Р.В.Гайнутдинов

**А**томно-силовой микроскоп (АСМ) на наших глазах становится одним из самых популярных исследовательских инструментов. Редкая лаборатория, изучающая на микроуровне самые разнообразные объекты — будь то кристаллы, пленки, жидкостные молекулярные системы, биологические препараты, — не стремится заполучить такой удобный компактный прибор, который позволяет проводить экспресс-анализ образцов в комнатных условиях. Есть даже проект включить работу на нем в программу школьного физического практикума. Наша отечественная компания NT-MDT (Зеленоград), делающая подобные микроскопы, расширяет производство и даже выходит на мировой рынок. Число публикаций, авторы которых привлекают АСМ-данные, год от года растет. Но все это не должно помешать нам критически взглянуть на новую моду и беспристрастно взвесить ценность получаемой информации.

Дело в том, что изображение атомно-силовой микроскоп создает необычным образом. И наши глаза, и привычные микроскопы, включая электронные, оперируют картинками взаимодействия излучений того или другого рода с образцом. АСМ-изображение формируется в результате «ощупывания» поверхности микронзондом, что делает уместной аналогию с тактильным восприятием слепого, когда визуальный образ порождается контактными ощущениями. Необходимо быть уверенными, что регистрируемый сигнал правильно переводится на изобразительный язык. Записать картинку не так уж трудно, этому действительно можно научить школьника, но что мы на ней увидим, насколько она соответствует реальности?

## «Ощупывания» зонда

Пусть мы хотим получить представление о микрорельефе поверхности объекта — определить для каждой ее точки высоту и привязать последнюю

к координатам на плоскости, снять «топографию местности». На самом деле кавычки здесь не нужны — такие изображения и называют топографическими. Основным элементом АСМ, микронзонд, который сканирует образец, именуется кантилевером (от англ. cantilever — кронштейн). Он представляет из себя ориентированную вдоль поверхности миниатюрную консоль, на конце которой сидит вертикальный щуп — иглочка (острие) с предельно (до единиц нанометра) уменьшенным радиусом закругления кончика. Взаимодействие острия с поверхностью — тот самый процесс, что создает изображение. Кантилевер подводится к поверхности на столь близкое расстояние, что в игру вступают силы межмолекулярного взаимодействия между атомами острия и образца. Характер зависимости этой силы от расстояния напоминает рис.1. Положительные значения силы отвечают отталкиванию, когда острие механически контактирует с поверхностью, практически царапает ее (на атомном уровне это означает, что электронные оболочки атомов соприкасаются и взаимно деформируют друг друга). При чуть большем расстоянии, когда атомы «расцепляются», между ними возникает притяжение (сила становится отрицательной) — за счет спонтанно возникающей взаимной поляризации электронных оболочек. В итоге кантилевер изгибается, стремясь оттолкнуться от поверхности или приблизиться к ней. Естественно считать, что взаимодействие одинаково на равных расстояниях; система обратной связи в управлении вертикальным позиционированием зонда поддерживает силу постоянной, основываясь на упругом изгибе кантилевера, а лазерный интерферометрический детектор с высочайшей точностью (до тысячных долей нанометра) отмечает искомую высоту.

В зависимости от того, на каком расстоянии работает острие, различают три режима получения изображений (рис.1). В контактном режиме на зонд действует результирующая сила отталкивания (ее обычные значения —  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  Н). Такой метод лучше подходит при исследовании твердых поверхностей с развитым рельефом,

а для мягких объектов зачастую оказывается разрушающим. Поэтому для последних используют бесконтактный режим, когда зонд находится в сфере действия сил притяжения (в диапазоне  $10^{-10}$ — $10^{-14}$  Н). При столь мизерных значениях силы контролировать изгиб кантилевера при статичном скольжении трудно, и на помощь приходят более тонкие динамические эффекты. Возбуждаются свободные колебания кантилевера; в присутствии внешней силы их собственная резонансная частота меняется. Если с помощью обратной связи поддерживать постоянную амплитуду или смещение частоты колебаний, можно вновь отыскивать точки с равными значениями силы. Точнее, с постоянным ее градиентом (в формулу для частоты входит производная от силы по расстоянию). Но такой «вибрационный стиль» работы требует высокого вакуума — на воздухе из-за сопротивления среды добротность колебательной системы будет недостаточной. Высоковакуумные АСМ существуют, и именно они позволяют достичь атомного разрешения, но подобное оборудование гораздо дороже, а главное, далеко не все органические объекты переносят высокий вакуум. Для исследований на воздухе разработан третий вариант — прерывисто-контактный режим. Кантилевер тоже вибрирует, но ближе к поверхности, слегка касаясь ее в нижней точке траектории. Зонд оказывается в пограничной ситуации — попеременно действует то сила отталкивания (5—10% времени), то сила притяжения (на уровне  $10^{-8}$ — $10^{-13}$  Н). Так удастся исследовать мягкие объекты и объекты с атомарно гладкими поверхностями.

Итак, мы получили набор «высот» — вертикальных координат точек, в которых на острие действует одинаковая по величине сила, и считаем, что построили для каждой линии скана профиль рельефа поверхности. Но пока в наших рассуждениях фигурировала только одна сила. А если образцу, помимо всегда присутствующего межмолекулярного взаимодействия, сопутствует другое — элект-

ростатическое, магнитное, капиллярное? Когда эти силы всюду одинаковы, они образуют лишь некоторую добавку, сдвинув абсолютную шкалу и видоизменив зависимость с рис.1. Но чаще придется иметь дело с неоднородными в разных отношениях поверхностями, и эта неоднородность как раз и составляет предмет изучения. Тогда не исключено возникновение смешанного контраста, когда за деталями топографического изобра-



**Алла Леонидовна Толстихина**, кандидат физико-математических наук, заведующая сектором сканирующей зондовой микроскопии Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Научные интересы связаны с развитием методов атомно-силовой микроскопии и исследованием с их помощью структуры и свойств поверхностей объектов различной природы.



**Кира Львовна Сорокина**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института, редактор отдела физики журнала «Природа». Область научных интересов — физические процессы на поверхности кристаллов и тонких пленок.



**Наталья Васильевна Белугина**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института. Специалист в области физики сегнетоэлектричества и реальной структуры кристаллов.



**Радмир Вильевич Гайнутдинов**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института. Занимается применением сканирующей зондовой микроскопии для изучения разнообразных объектов и целенаправленной модификации поверхности.

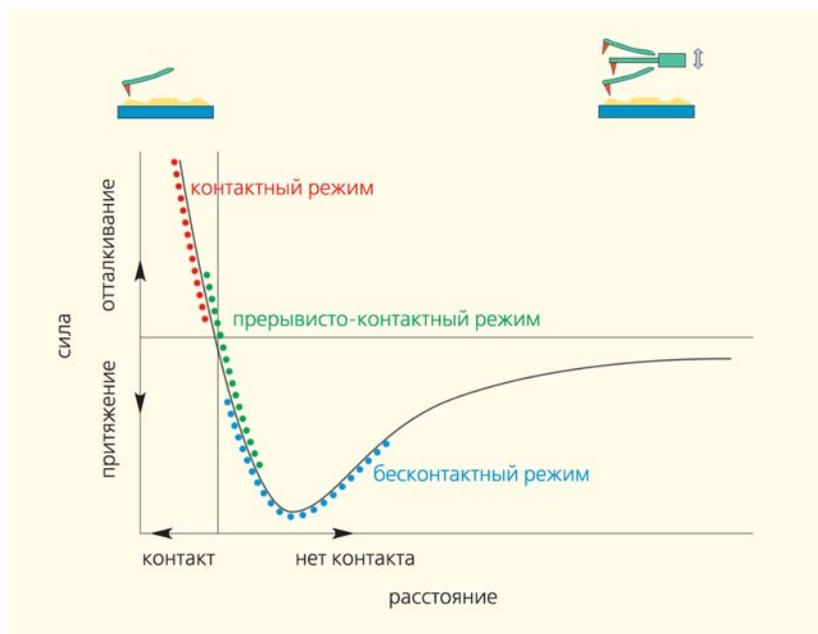


Рис.1. Зависимость силы межмолекулярного взаимодействия от расстояния зонд—образец и режимы АСМ, соответствующие работе в разных интервалах расстояния.

жения стоят не реальные особенности рельефа, а хитрые комбинации различных факторов.

Вообще-то именно тот факт, что на движение зонда могут влиять различные силы, позволил кардинально расширить возможности атомно-силовой микроскопии. Используя разные материалы для зонда (непроводящие/проводящие, немагнит-

формационную ценность придает таким локальным картам то, что их можно сопоставлять с топографическими, т.е. выявлять связь свойств с морфологическими особенностями. Ограничимся здесь топографическим аспектом атомно-силовой микроскопии: постараемся понять, реальную ли геометрию поверхности мы видим.

ные/магнитные) и прибегая к другим ухищрениям, чтобы вывести на первый план те или иные взаимодействия (подавая электрическое напряжение — постоянное, переменное и т.д.), удалось создать целый букет методов для измерения разнообразных характеристик (табл.).

Принципиально важно, что так можно измерять локальные значения величин, составляя в итоге «карты» их распределения по поверхности, — это сделало модификации АСМ незаменимым инструментом в исследовании наноматериалов. Но какую бы характеристику мы ни анализировали, основополагающим все равно остается определение геометрической топографии, и вот почему. Во-первых, измерения следует проводить на постоянной высоте (чтобы исключить зависимость искомой величины от расстояния зонд—образец). Во-вторых, особую ин-

**Таблица**

**«Наследники» атомно-силовой микроскопии**

Вид микроскопии	Что измеряется / в каком режиме	Где используется
Магнитная силовая микроскопия	Магнитные силы / бесконтактный	Определение магнитных параметров; визуализация магнитных доменов; исследование процессов локального перемагничивания
Сканирующая микроскопия Кельвина	Электрический потенциал / бесконтактный	Изучение электрической неоднородности поверхности, анализ работы микросхем
Сканирующая емкостная микроскопия	Локальная емкость поверхности / бесконтактный	Диагностика конструкции микросхем; изучение распределения легирующих примесей в полупроводниках
Электростатическая силовая микроскопия	Электростатические силы / бесконтактный	Исследование сегнетоэлектриков; изучение распределений электрических полей и зарядов в работающих микросхемах
Микроскопия пьезоотклика	Электромеханический отклик / контактный	Изучение пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков, их доменной структуры в статике и динамике, процессов переключения
Сканирующая резистивная микроскопия	Ток / контактный	Определение локальных электрических характеристик проводников, картирование распределения проводящих и непроводящих областей
Микроскопия боковых сил	Крутильная деформация кантилевера / контактный	Нанотрибология; определение гомогенности поверхности
Термическая сканирующая микроскопия	Теплопроводность / контактный	Исследование химических реакций и фазовых превращений на поверхности

## Нежеланные артефакты

Если в археологии артефакты — творения рук человеческих (от англ. artefact — искусственный объект) — основной предмет поиска и источник знаний, то в микроскопии это слово несет крайне негативный оттенок. Так называют искусственные искажения изображений, помехи, созданные какими-то посторонними по отношению к объекту факторами. Чтобы получить достоверную информацию, нужно уметь распознавать артефакты и избавляться от них. Классифицировать их можно по источнику возникновения. Для АСМ мы предложили деление на три группы:

- инструментальные артефакты, связанные с погрешностями измерительной системы;
- артефакты режима, вносимые оператором-микроскопистом, который может ошибиться при выборе параметров режима работы;
- артефакты состояния, порождаемые особенностями взаимодействия между зондом и образцом (в частности, уже упоминавшееся участие «посторонних» сил в формировании изображения).

Разговор об *инструментальных артефактах* логично начать, обратив более пристальное внимание на сам зонд. Пока мы чисто качественно считали его точечным. Но реальное острие имеет некоторые размеры (даже необходимые для атомного разрешения тончайшие иголочки, на концах которых расположены единичные атомы, все же имеют ощутимую длину). Как показывает теория, получаемая картинка на самом деле представляет собой так называемую свертку, или конволюцию, истинного изображения и геометрии острия [1]. Особенно заметны эффекты конволюции, которые визуальнo обычно выражаются в расширении или сужении изображения, если размеры деталей рельефа поверхности соизмеримы с радиусом кривизны зонда. Насколько можно обмануться, демонстрирует рис.2.

Строго говоря, надо бы учитывать взаимодействие с образцом не только самого острия, но и кантилевера в целом. Особенно это актуально для неконтактных режимов. Такое взаимодействие заметно расширяет область объекта, дающую вклад в изображение данной точки. К счастью, для колебательных режимов контраст определяет не сама сила, а ее градиент, поэтому решающей оказывается область с более быстрым изменением силы — вблизи самого

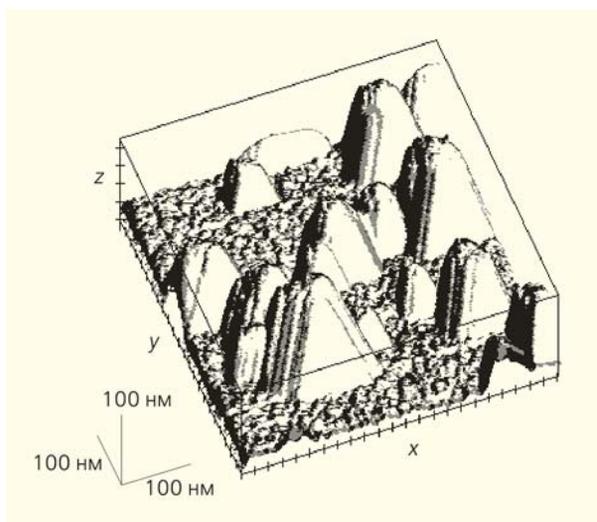


Рис.2. Полученное в контактном режиме экспериментальное изображение поверхности кремниевой подложки, на которой выращены кристаллы алмаза. Кажется, что мы видим сами частицы, но в действительности картина треугольной грани отражает пирамидальную форму острия из нитрида кремния.

острия. Влияние кантилевера будет тем меньше, чем тоньше и длиннее острие. Разницу в изображениях одного и того же образца, полученных при разных радиусах острия, помогает почувствовать рис.3.

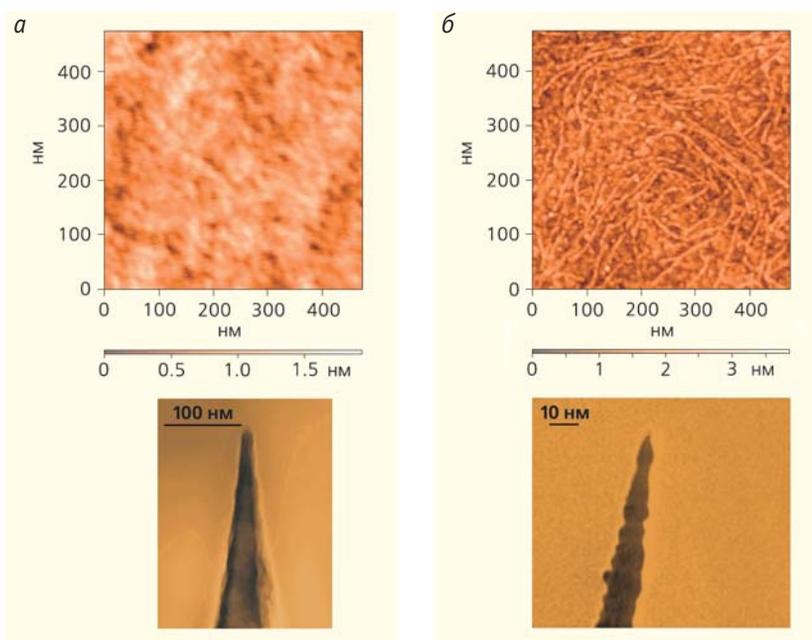


Рис.3. Влияние радиуса закругления острия на разрешение. Топографические изображения образца полианилина получены в прерывисто-контактном режиме с помощью кремниевых зондов — стандартного, с радиусом кончика 10 нм (а), и сверхострого, с радиусом 2 нм (б). Приведены также электронно-микроскопические изображения соответствующих острий.

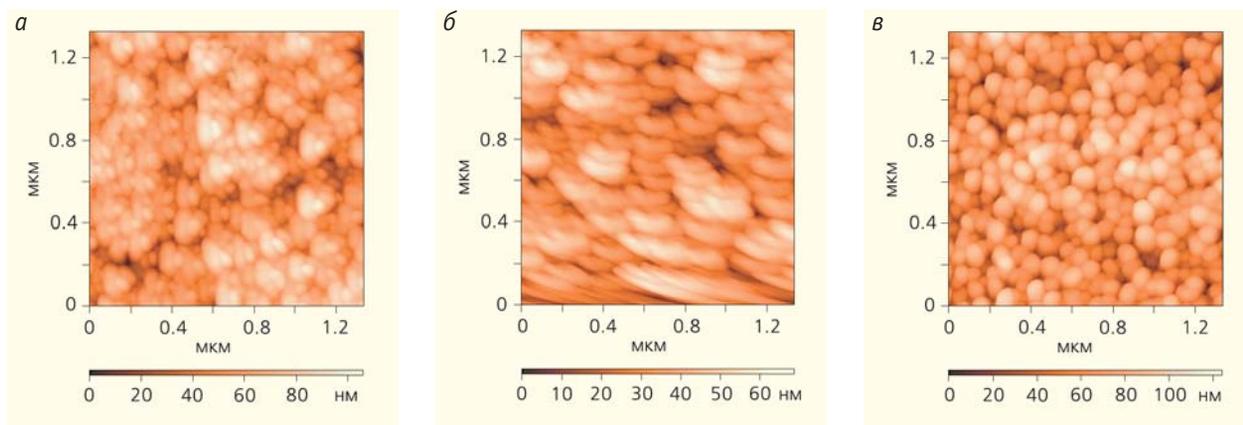


Рис.4. Проявление инструментальных артефактов. Топографическое изображение поверхности пленки оксида цинка (прерывисто-контактный режим) искажено из-за повреждения острия (а) и из-за повреждения острия в сочетании с крипом сканера (когда пьезоэлектрик реагирует на приложенное напряжение сначала быстрой, но не окончательной деформацией, а затем более медленным выходом на максимум растяжения или сжатия — в результате фрагменты рельефа причудливо изгибаются, б). Настоящее, качественное изображение выглядит иначе (в).

В действительности играет роль не только исходное качество зонда, но и его состояние — в ходе работы острие изнашивается и загрязняется. То, что атомы способны «цепляться» за острие и переноситься им, делает АСМ ценнейшим средством манипуляций в нанотехнологии, но с точки зрения получения изображений это беда. Пример искажений из-за повреждения зонда («размножение» изображений) дает рис.4,а. Хотя подобные артефакты можно распознать по четким признакам — странным множественным деталям, на конференциях иногда фигурируют некачественные изображения такого рода.

Конечно, технические погрешности нельзя оставить только «на совести» зонда. Нам ведь нужно знать не только высоту точек образца, но и место их расположения. Перемещение зонда вдоль поверхности обеспечивает пьезоэлектрический сканер. Несмотря на то что достигнуты поразительные успехи в точности сканирования (в реальности сдвигается не кантилевер, а образец под ним) — до сотых долей нанометра, здесь есть свои подводные камни. Сканеру присущи нелинейность и гистерезис зависимости удлинения пьезоэлектрика от прикладываемого напряжения, крип

(двухстадийная реакция при подаче напряжения), термический дрейф характеристик, старение, наконец. На изображениях такие эффекты будут проявляться в виде неравномерности шага сканирования, смещения двух картинок, снятых «навстречу друг другу», искажениях при изменении скорости сканирования и др. (рис.4,б).

Внося свою лепту в искажения и электронные компоненты прибора. Не останавливаясь на них, обратимся к артефактам режима. При записи изображения оператору прежде всего надо определиться, какой режим лучше использовать для конкретной задачи. Перед началом сканирования предстоит выбрать значения ряда параметров: силу прижатия зонда к поверхности (для контактного режима), высоту зонда над поверхностью и амплитуду колебаний кантилевера (для прерывисто-контактного режима), скорость сканирования. Установочные параметры могут варьироваться в широких пределах (амплитуда колебаний, например, — от 10 до 100 нм). Ошибка при выборе может драматически изменить результат. И дело не только в снижении разрешающей способности и даже не только в потенциально плачевной судьбе образца (печальный исход задокументирован на рис.5



Рис.5. Разрушение молекулы IGG, сидящей на слюде, в ходе АСМ-эксперимента (прерывисто-контактный режим) [2]: первое изображение (а); изображение при втором сканировании на более низкой высоте (б); третье сканирование показывает уже полностью разрушенную молекулу (в).

[2]), что, в общем-то, поддается осознанию, но и в возможном получении заведомо искаженных данных. Последнее вполне может ускользнуть от внимания исследователя. Как показано в работе [3], прерывисто-контактному режиму внутренне свойственно то, что измеряемая высота зависит от амплитуды колебания кантилевера. Детальное экспериментальное исследование с привлечением моделирования позволило авторам заключить, что определяемые высоты наночастиц ближе всего к истинным при малых значениях амплитуды (5–10 нм). При работе с мягкими объектами неправильный выбор амплитуды может даже привести к обращению контраста, т.е. впадина будет выглядеть, как выступ, и наоборот [4]. Нам самим пришлось столкнуться с зависимостью измеряемой высоты доменной стенки диэлектрика от амплитуды колебаний. А неподходящая скорость сканирования способна исказить латеральные размеры деталей рельефа.

На регистрируемых значениях может сказаться и состояние окружающей среды — вибрация, акустические шумы (стук дверью, смех, громкий разговор — даже хлопок в ладоши может свести на нет час работы!), влажность, температура. Непостоянство температуры и влажности может повлиять не только на узлы прибора, «возмутив» их параметры (например, тот же пьезосканер при нагреве на 1°C может удлиниться на 0.5%), но и на образец. И тут мы переходим к *артефактам состояния* — источником ошибок иногда становится сам объект, если вдруг приобретет какие-то чуждые, не свойственные ему качества. Поверхность может быть загрязнена в прямом смысле слова. Так, реальный нанорельеф поверхности кристалла бериллия обнаруживается лишь после дополнительной очистки от адсорбированных слоев (рис.6). Особая роль принадлежит слоям воды, которые могут порождать капиллярную силу, «сковывающую» движения кантилевера. Вообще дополнительные силы, как уже говорилось, вносят путаницу при интерпретации природы контраста. Отдельно следует отметить случай «электростатического» загрязнения. Если поверхность электрически заряжена, зонд будет ощущать дальнедействующее электростатическое притяжение между зарядами образца и индуцируемыми ими зарядами противоположного знака на острие. В зависимости от распределения заряда (более однородного или локализованного) на изображении могут возникнуть либо общее размытие картины, либо отдельные особенности, которые будут ошибочно восприняты как выступы

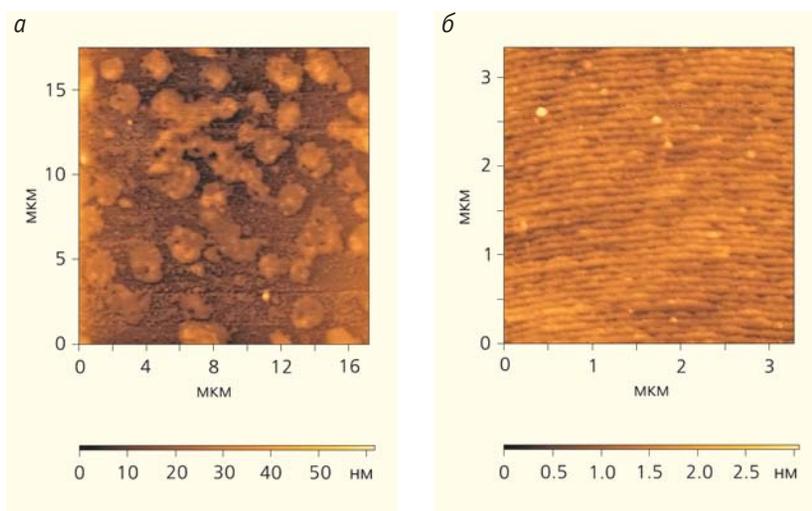


Рис.6. Роль загрязнений исследуемого образца. Поверхности роста кристалла бериллия до (а) и после (б) очистки (прерывисто-контактный режим).

микрорельефа (об этом эффекте мы подробно рассказали в предыдущей статье [5]). А наличие статического заряда — обычное дело для диэлектрических поверхностей.

И что же мы имеем в сухом остатке? Читатель, пожалуй, уже решил, что данным АСМ совсем не следует доверять...

### Эксперимент — борьба

Разумеется, все не так безнадежно, как могло показаться на первый взгляд. Устранением инструментальных артефактов серьезно озабочены производители микроскопов. Совершенствуется конструкция сканера; разрабатывается программное обеспечение, автоматически корректирующее изображения; предлагаются тестовые структуры для периодической калибровки прибора; составляются рекомендации по выбору установочных параметров. Однако что касается борьбы с артефактами состояния — она целиком ложится на плечи исследователя. И здесь свести к минимуму воздействие сторонних факторов на результаты измерений и приблизиться к максимуму возможностей АСМ может только очень грамотный оператор, набравшийся большого опыта. В этом отношении наш сектор зондовой сканирующей микроскопии достиг определенных высот, что подтверждают рис.3, 4, в и 6, б. И поскольку нам самим пришлось убедиться, сколь сильно внешние условия и состояние образца влияют на достоверность получаемой информации, мы предложили кардинальный выход из ситуации: работать на атомно-силовом микроскопе в специальных отсеках — чистых боксах.

Совместно с Исследовательским центром прикладной ядерной физики Росатома был раз-

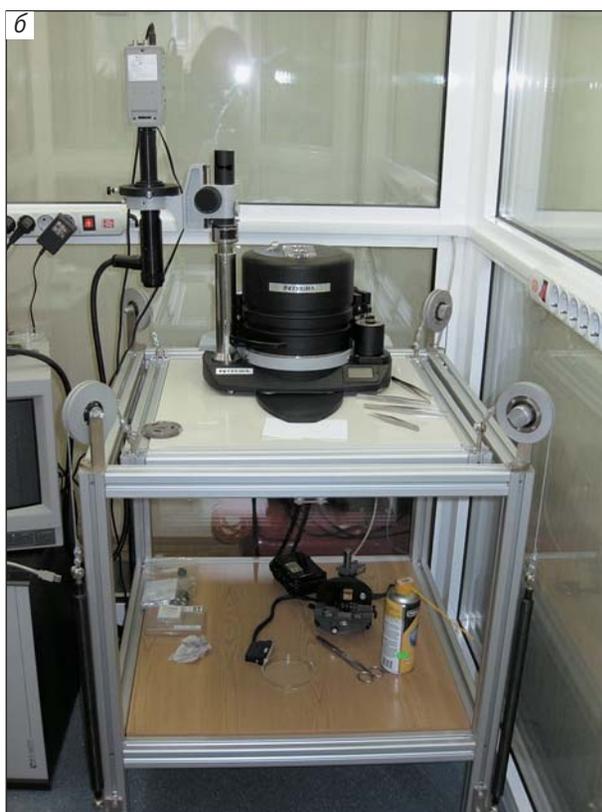


Рис.7. Общий вид чистого климатического бокса (а) и микроскоп, установленный на antivибрационном столе (б). В конструкции стола, спроектированного и сделанного в нашем институте, использован принцип пассивной виброзащиты.

работан и построен чистый климатический бокс TRACKPORE ROOM-02 (рис.7,а). Как и полагается, есть отдельный тамбур и сама чистая зона, где размещены два зондовых микроскопа фирмы NT-MDT — Solver P4-SPM и NTEGRA Prima. Для борьбы с механическими шумами предусмотрены две «линии обороны»: все чистое помещение смонтировано на локальном виброзащитном фундаменте, а сами приборы стоят на специаль-

ном столе (рис.7,б), который подавляет посторонние колебания. Помогают и установленные в боксах двойные стеклопакеты, защищающие от акустических помех.

Чистая зона соответствует классу 8 ИСО (100 000). Воздух, подаваемый в рабочую зону через двухконтурное газообменное устройство на основе трековых мембран, очищается от примесей и приобретает требуемый газовый состав. Чистота воздушной атмосферы и поверхности изучаемых объектов поддерживается в течение необходимого для экспериментов времени. Это принципиально, поскольку зачастую нужно получать целую серию АСМ-изображений, что может занимать значительное время. А иногда и один процесс растягивается — так, процедура записи регулярной наноразмерной структуры на поверхности сегнетоэлектрика длится несколько часов. Как мы удостоверились, при хранении в условиях чистого помещения на образце не образуется видимых микроскопу загрязнений даже за неделю, тогда как в обычной лабораторной комнате частицы пыли осаждаются уже в ходе эксперимента, что искажает истинное состояние поверхности. Блок управления микроскопом вынесен за пределы зоны. Это, с одной стороны, повышает комфортность работы оператора, с другой — устраняет воздействие человека на исследуемый объект в ходе эксперимента.

В рабочей камере обеспечиваются различные сочетания температуры (20–30°C с точностью  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ) и влажности (30–70% с точностью  $\pm 1\%$ ). Надежная термостабилизация микроскопа нужна прежде всего потому, что на долю термического шума приходится значительная часть погрешности АСМ. Тепловые дрейфы сканера и колебания кантилевера — источник ошибок измерений во времени, поэтому производители приборов требуют, чтобы изменение температуры окружающей среды не превышало  $1^\circ\text{C}$  в час. Кроме того, бывает, что стабильность температуры объекта критична для самого эксперимента (например, для сегнетоэлектриков при исследовании доменной структуры, для пьезоэлектриков). Контроль за влажностью в зоне не менее важен.

В нашем континентальном климате относительная влажность в холодный период, если нет искусственного увлажнения, опускается существенно ниже регламентированных значений (50–60%). В отапливаемом помещении она может упасть при комнатной температуре практически до 0 (для сравнения: даже в Сахаре влажность воздуха выше 15%). Поэтому на диэлектрических образцах обычно накапливается электростатический заряд, который, как говорилось, служит источником артефактов. Управляя влажностью, мы научились снимать статический заряд с поверхности различных диэлектриков и избавляться от подобных искажений [5, 6], что в 2011 г было запатентовано. В прерывисто-контактном режиме

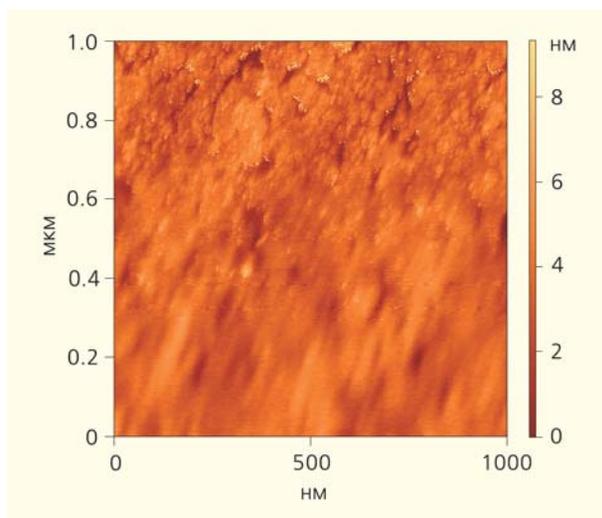


Рис.8. Устранение артефактов состояния с топографического изображения полированной поверхности ситалла (прерывисто-контактный режим) в ходе записи. Во время сканирования был снят статический заряд, что резко улучшило четкость.

процесс снятия заряда можно наблюдать в течение сканирования в режиме реального времени (рис.8 [6]). Кроме борьбы с вредным влиянием статического электричества в активе опции «контролируемая влажность» — дополнительные экспериментальные возможности, например, исследования процессов адсорбции воды на поверхности (они, напомним, тоже могут приводить к искажениям изображений), в том числе для водорастворимых кристаллов.

Опыт эксплуатации комплекса в течение нескольких лет был крайне положительным. Он вдохновил нас создать второй климатический бокс для атомно-силовой микроскопии — TRACKPORE ROOM-05 — уже по-настоящему метрологического класса. Новый бокс отличается более высокой (на несколько порядков) степенью чистоты, более глубокой виброзащитой и большими пределами управления искусственным климатом. В результате предпринятых усилий мы можем уверенно утверждать: наше оборудование позволяет получать достоверные и, что принципиально важно, воспроизводимые данные.

### Заслуженные победы

Основное направление наших исследований — изучение различных наноразмерных структур методом атомно-силовой микроскопии на воздухе. Диапазон объектов довольно широк. Это и поверхности твердых материалов — кристаллов, выращенных в нашем институте (в основном — диэлектриков, включая сегнетоэлектрики), и поверхности керамических и монокристаллических подло-

жек, использующихся под различные покрытия. Обширный класс изучаемых систем — мягкие полимерные пленки, полученные методом Ленгмюра—Блоджетт, в которые вводятся функциональные наноструктуры — например, белковые молекулы, очень удобные для моделирования, позволяющие изучать процессы взаимодействия различного типа. Какого рода информацию нам удастся получить? Ответим парой конкретных примеров.

При изучении сегнетоэлектриков приходится иметь дело с наиболее запутанной ситуацией: на поверхность кристалла в сегнетофазе выходят по-разному ориентированные домены. Это классический случай смешанного контраста, когда в формирование топографического изображения вмешиваются электростатические силы. Отрабатывали корректную методику исследования мы на триглицинсульфате — хорошо известном веществе, которое может служить подходящим модельным материалом во многих задачах изучения сегнетоэлектричества. Привлекая «электрические» модификации АСМ — сканирующие микроскопии Кельвина, пьезоотклика, электростатическую, мы смогли разобраться [5, 6], в каких случаях на топографических изображениях видны детали реального микрорельефа, а в каких себя обнаруживают границы доменов (рис.9). В частности, было установлено, что характерные округлые элементы нанорельефа в виде выступов и ямок фиксированной высоты/глубины (в полпараметра постоянной решетки, 6.3 Å), которые постоянно наблюдаются на атомарно гладкой поверхности естественного скотта кристалла триглицинсульфата вдоль плоскости спайности, представляют собой реальные топографические особенности. Эти детали рельефа стабильны по отношению к нагреву и связаны с наличием собственных дефектов в объеме кристалла. Неизменность вертикальных размеров островков и ямок может сослужить хорошую службу: подобные образцы пригодны в качестве тестовой структуры для калибровки пьезосканера при измерениях высот от ≈3 нм (в 2002 г. в секторе получен патент на такой способ калибровки). Изучение кристаллов со специально введенными примесями доказало, что АСМ-исследования поверхности раскола дают возможность эффективно контролировать распределение дефектов в объеме кристалла [7]. Все это позволило анализировать столь тонкие процессы, как динамика доменных стенок в различных экспериментальных условиях.

Пример из совсем другой области — исследование пленок полианилина. Этот линейносопряженный полимер в легированном (протонированном — сильными кислотами) состоянии очень привлекателен своей высокой электропроводностью, но технологическому применению пока препятствует его крайне низкая растворимость. Преодолеть этот недостаток можно, если ввести в раствор при синтезе высокорастворимый полиэлектролит. Органические полисульфоуксусные кислоты в такой

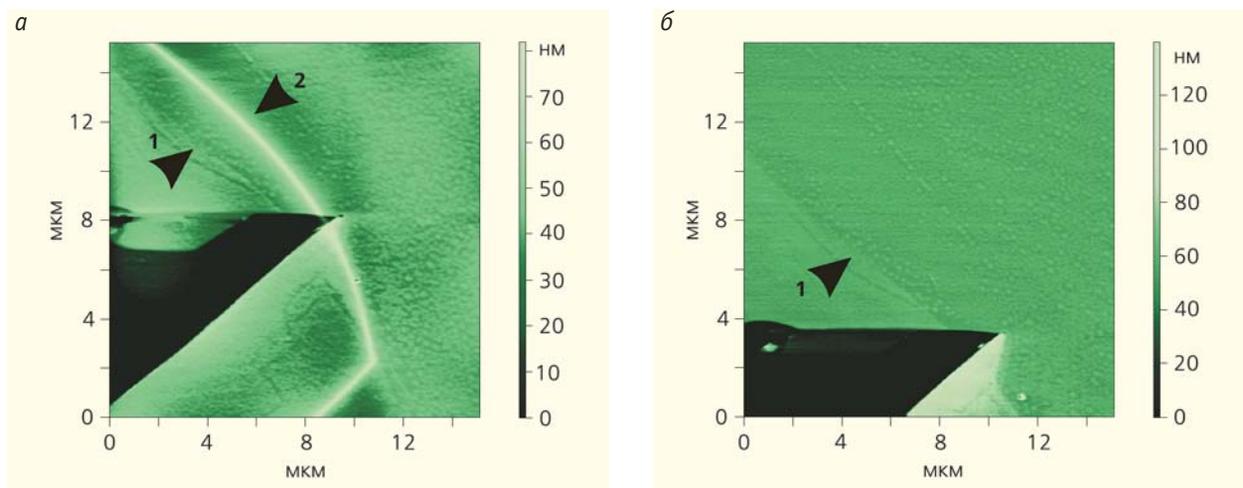


Рис.9. Один и тот же участок поверхности кристалла триглицинсульфата с остроугольной впадиной. На картинках, полученных в прерывисто-контактном режиме (а), обнаруживаются элементы доменной структуры (доменные границы, разделяющие положительные и отрицательные домены — 2). В контактном режиме виден только рельеф — 1 (б).

роли «убивают сразу двух зайцев»: достигается и легирование, и растворимость. Правда, в итоге приходится иметь дело с материалом из интерполимерных комплексов, у которого обостряется зависимость свойств от метода и условий получения. С помощью АСМ мы изучили морфологию поверхности пленок, синтезированных с участием поли(2-акриламидо-2-метил-1-пропан)сульфо-кислоты разными методами — химически и ферментативно (реакцию полимеризации инициирует лакказы), с ускорителями реакции и без них [8]. Оценивалась степень гомогенности, выявлялись фазовые неоднородности, определялся размер структурных элементов. Было обнаружено, что

пленки имеют нанокompозитный характер, полисульфокислота образует непрерывную матрицу, в которую инкорпорированы глобулярные включения — наночастицы полианилина (рис.10). С практической точки зрения более интересны самые мелкодисперсные системы — они, как выяснилось, получаются ферментативно. Химический способ продуцирует более крупные, но зато более близкие друг другу по размеру частицы. Сопоставить «электропроводящие» качества образцов помогла сканирующая резистивная микроскопия — еще один «дочерняя» техника АСМ, позволяющая регистрировать поверхностное распределение тока через образец и измерять локальные вольт-

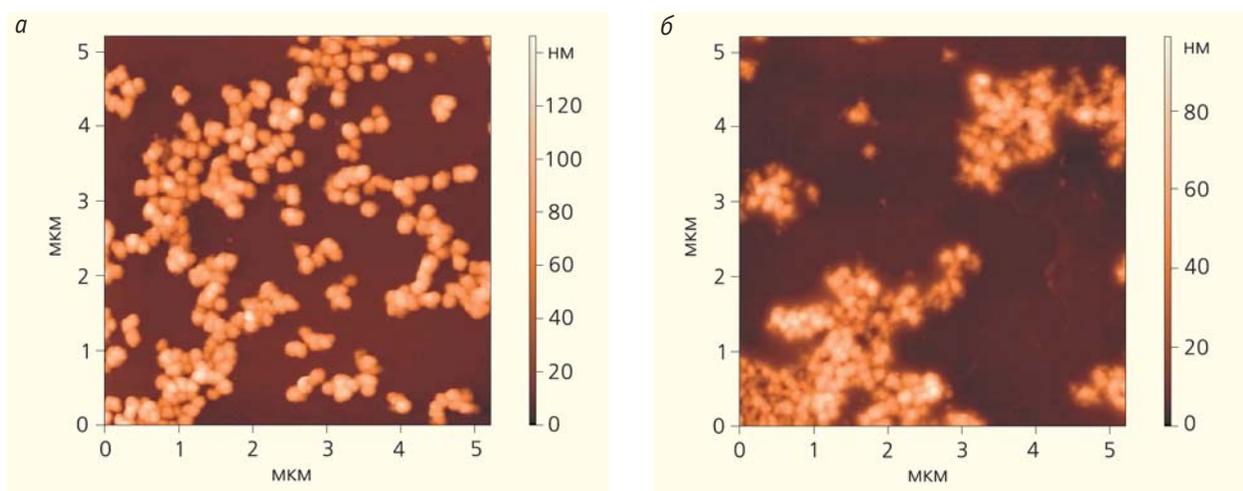


Рис.10. Сравнение двух способов получения полианилина. Поверхности композитных пленок полианилин-полисульфокислота, осажденных из растворов химически (а) и ферментативно (б) синтезированного полимера (прерывисто-контактный режим). В первом случае средние латеральные размеры образцов составляют более 180 нм, а высоты глобул — более 100 нм, во втором — 80—140 нм и 20—100 нм и более 100 нм соответственно (размер частиц становился меньше при добавлении ускорителей реакции).

амперные характеристики. Так можно контролировать степень однородности по электропроводности на наноуровне, судить о характере проводимости (вольт-амперные характеристики демонстрировали отчетливое не омическое поведение) и анализировать связь полученных данных с морфологией пленок. В пределах одного зерна зачастую обнаруживалось несколько областей с различной проводимостью [9]. В целом «химические» образцы отличались большей электропроводностью, что может быть связано как с более эффективным допированием, так и с образованием более длинных цепочек в ходе полимеризации. Ферментативный метод, однако, намного технологичнее, поэтому целесообразно продолжить изыскания, которые могли бы «поднять» его на необходимый для приложений уровень.

В этих исследованиях были задействованы разные модификации АСМ, что позволяет максимизировать потенциал метода — изучать локальные свойства объекта в привязке к особенностям микрорельефа. Однако было бы неправильно думать, что топографические изображения служат лишь для простого разглядывания — для качественной оценки однородности и определения размеров деталей рельефа. Это далеко не так.

## Не картинкой единой

В обеих упомянутых работах мы привлекали специальное программное обеспечение, разработанное для анализа геометрии частиц, — находились выступающие над поверхностью объекты, их сечения аппроксимировались известными геометрическими фигурами (кругом, эллипсом), рассчитывались средние геометрические параметры структурных элементов, строились гистограммы распределения элементов по размерам. Иначе говоря, топографические изображения не сводятся просто к визуальным образам, а дают конкретную количественную информацию. Но здесь на поверхности присутствуют дискретные элементы рельефа — островки/впадины, домены, наночастицы. А если изображаемая поверхность такими яркими деталями не блещет? Оказывается, статистический анализ возможен и в данном случае.

Поскольку топографические АСМ-данные — это регулярный набор высот точек объекта, можно сказать, что у нас в руках двумерная функция рельефа  $z(x, y)$ , где аргументы  $x$  и  $y$  задаются целым числом шагов сканирования в соответствующих направлениях  $i, j$ . Задана она численно, и ее можно подвергать дальнейшей цифровой обработке. Для описания измеряемых профилей применяется целый набор параметров, основанных на статистическом подходе к интерпретации функции  $z$  (отсчитывают ее не от нуля, а от средней плоскости объекта). Так называемые метрические параметры включают в себя прежде всего

размах высот — сумму  $|z|$  для наибольших выступа и впадины, среднюю арифметическую шероховатость — усредненное значение  $|z(i, j)|$ , среднюю квадратическую шероховатость — квадратный корень из усредненного значения  $z(i, j)^2$ . На языке статистики первая шероховатость — это первый момент распределения, изображаемого нашей функцией  $z$ , который определяет его центр, а вторая — второй момент, задающий «действующее» значение шероховатости. В общем случае шероховатость зависит от размера области сканирования. На основе статистики сканирования вводятся и другие параметры, выражаемые через высшие моменты, которые характеризуют симметрию распределения двумерного профиля относительно своего среднего значения и протяженность распределения. Для оценки равномерности рельефа рассчитываются разнообразные функции, из которых самые примечательные — корреляционная функция шероховатости и спектральная плотность мощности шероховатости. Корреляционная функция дает количественное представление о вариации высот и корреляционной связи между выбранными областями сканирования в широком диапазоне изменения масштаба сканирования. С ее помощью определяют размеры областей корреляции и вычисляют спектральную плотность мощности. Последняя отражает в обратном (частотном) пространстве, как распределены по величине занимаемой площади элементы с той или иной высотой.

Помимо перечисленных используется множество других параметров: функциональные, которые характеризуют не распределение в целом, а рельеф в локальной области; пространственные, вычисляемые на основе дискретного преобразования Фурье и выявляющие анизотропию и периодичность структуры; фрактальные, помогающие оценить масштабную инвариантность и самоподобие формы. Интересующихся деталями отсылаем к нашей публикации [10], где все параметры строго классифицированы, распределены по ступеням иерархии в последовательности «точка — зона сканирования — образец в целом», приведены соответствующие формулы и алгоритмы их вычисления. Ограничимся только иллюстрацией, для чего они могут понадобиться.

Не обойтись без такого статистического анализа рельефа прежде всего для сверхгладких поверхностей, как полированных для изготовления прецизионных конструктивных элементов, так и исходно атомарно гладких, выступающих в роли подложек в нанoeлектронике. Расчетная шероховатость и ее производные параметры становятся в таком случае критическими для прикладной судьбы образцов. Выполненные в нашем секторе многочисленные измерения шероховатости пластин лейкосапфира, ситалла, кварца и др. послужили основой для отработки технологических ухищрений при их изготовлении.

Но безусловно полезными эти параметры оказываются и для более развитых поверхностей. Так, анализ корреляционных функций для полиэлектролитной пленки (прекурсора) и иммобилизованной пленки белка (лизоцима и иммуноглобулина) показал, что белок покрывает поверхность прекурсора почти полностью. А при исследовании пленок диоксида титана, полученных пиролизом при разных условиях, по длине корреляции удалось определить размер образующихся кристаллитов и установить степень их однородности по размерам при разных температурах осаждения. Методом высокочастотного ионно-плазменного распыления пленки диоксида титана получают в аморфном состоянии, и в этом случае корреляционные функции позволяют выявить так называемый эффект апельсиновой корочки, часто наблюдаемый на электронно-микроскопических снимках аморфных веществ.

Отдельно надо подчеркнуть, что по параметрам шероховатости удается провести верификацию данных АСМ независимым методом, что, вообще говоря, довольно проблематично. А тут, сравнивая кривые спектральной плотности мощности, рассчитанные по АСМ-измерениям и данным рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света, мы можем доказать — наши результаты соответствуют реальности. Методы эти имеют дело не только с разной физикой, но и с разными площадями поверхности, с которой собирается информация. Такая работа действительно была проделана в нашем секторе на сверхгладких полированных поверхностях кварца и ситалла, и результаты не расходились более чем на 10%.

## Литература

1. Reiss G., Bruckl H., Vancea J. et al. Scanning tunneling microscopy on rough surfaces-quantitative image analysis // J. Appl. Phys. 1991. V.70. P.523—525.
2. San Paulo A., Garcia R. High-resolution imaging of antibodies by tapping-mode attractive and repulsive tip-samples interaction regimes // Biophysical J. 2000. V.78. P.1599—1605.
3. Mechler A., Kopniczky J., Kokaev J. et al. Anomalies in nanostructure size measurements by AFM // Phys. Rev. 2005. V.72. P.125407.
4. Pickering J.P., Vancso G.J. Apparent contrast reversal in tapping mode atomic force microscope images on films of polystyrene-b-polyisoprene-b- polystyrene // Polym. Bull. 1998. V.40. P.549—554.
5. Толстихина А.Л., Сорокина К.Л., Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В. Электричество под микроскопом // Природа. 2009. №4. С.18—27.
6. Толстихина А.Л., Гайнутдинов Р.В., Занавескин М.Л. и др. Специфические артефакты топографических изображений диэлектрических материалов в атомно-силовой микроскопии // Кристаллография. 2007. Т.52. №5. С.925—931.
7. Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В., Ломакова Е.М. и др. Нанорельеф естественного скола кристаллов триглицинсульфата с примесями замещения и внедрения // Кристаллография. 2011. Т.56. №3. С.373—379.
8. Симагина Л.В., Гайнутдинов Р.В., Степина Н.Д. и др. Структурная организация пленок интерполимерных комплексов на основе полианилина и полисульфоуксусной кислоты в зависимости от методов синтеза // Кристаллография. 2010. Т.55. №4. С.727—733.
9. Симагина Л.В., Гайнутдинов Р.В., Степина Н.Д. и др. Структура и электрические свойства наноструктурированных пленок полианилина // Наноматериалы и наноструктуры. 2010. Т.1. №2. С.51—54.
10. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа в сканирующей зондовой микроскопии // Заводская лаборатория. 1999. Т.65. №9. С.31—41.

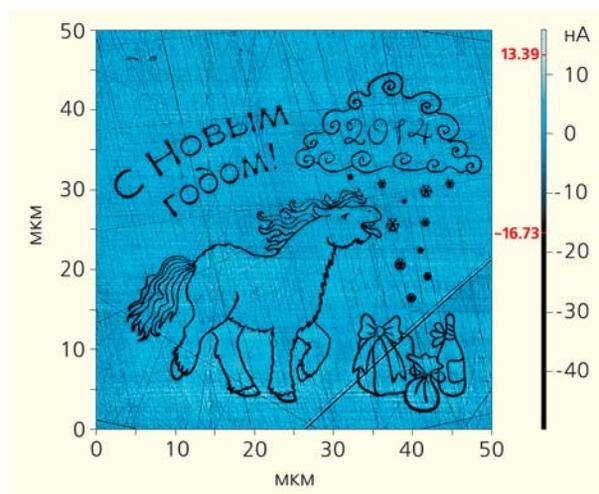


Рисунок А.Ф.Тарасовой, перенесенный на поверхность сегнетоэлектрического кристалла ниобата бария-стронция. Доменная структура создана и зарегистрирована с помощью атомно-силового микроскопа Р.В.Гайнутдиновым.

\* \* \*

Итак, использование чистых зон с искусственным управляемым климатом и повышенной виброзащитой дает несомненные преимущества для атомно-силовой микроскопии, особенно для применений в качестве средства измерения в нанометровом диапазоне размеров. Можно констатировать, что у АСМ есть прекрасные перспективы для решения нанотехнологических задач — при условии, что мы можем быть уверенными: регистрируются характеристики, присущие самому объекту, а не прибору или окружающей среде. ■

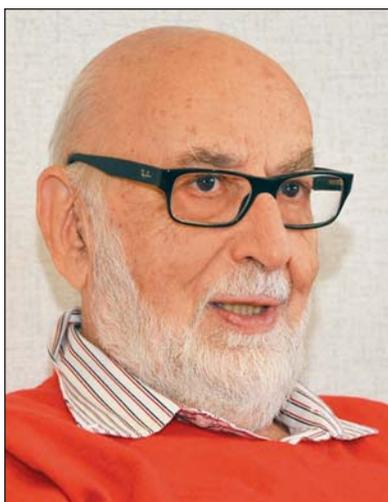
# ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2013 ГОДА

## По физике — Ф.Энглер и П.Хиггс

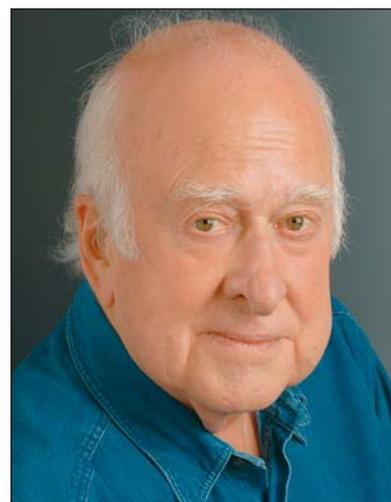
Присуждение Нобелевской премии по физике в этом году сюрпризов не принесло, хотя объявление лауреатов и задержалось на целый час. Как и ожидалось, премию получили физики-теоретики Ф.Энглер и П.Хиггс «за теоретическое открытие механизма, который позволил понять происхождение масс элементарных частиц и который недавно подтвердился благодаря открытию в экспериментах ATLAS и CMS на большом адронном коллайдере в ЦЕРНе предсказанной фундаментальной частицы».

Франсуа Энглер (Francois Englert) родился в 1932 г. в Эттербеке (пригород Брюсселя, Бельгия). В 1955 г. получил в Брюссельском свободном университете диплом инженера-электромеханика, а в 1959-м там же защитил диссертацию по физике. В 1959—1961 годах работал вместе с Робертом Браутом в американском Корнелльском университете (штат Нью-Йорк), затем вернулся обратно, в родной университет (американец Браут тоже перешел на работу в Брюссельский свободный университет в 1961-м и принял бельгийское подданство). С 1980-го оба руководили там теоретическими исследованиями; Энглер ушел на пенсию в 1998-м почетным профессором. С 2011 г. — приглашенный профессор Чепменовского университета (Калифорния, США).

Питер Уэйр Хиггс (Peter Ware Higgs), уроженец английского города Ньюкасла (1929), окончил в 1950 г. Королевский колледж Лондонского университета, в котором затем получил докторскую степень по физике (1954). В 1960 г. переехал в шотландскую столицу и с тех пор работал в Эдинбургском университете (с 1980-го возглавлял кафедру теоретической физики, а в 1996-м



Франсуа Энглер.



Питер Уэйр Хиггс.

вышел на пенсию как почетный профессор). Член Лондонского королевского общества и Королевского общества Эдинбурга.

Имена обоих лауреатов тесно связаны с минимальной версией теории микромира, которая носит несколько неуклюжее название Стандартной модели. Эта теория описывает все известные элементарные частицы и все известные взаимодействия между ними\*. Неотъемлемой частью Стандартной модели служат поле Энглера—Браута—Хиггса и квант этого поля — бозон Хиггса (причина довольно вычурной терминологии будет ясна из дальнейшего). Бозон Хиггса был единственным не открытым до недавнего времени элементом Стандартной модели — его открыли в 2012 г. на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. К сожалению, Роберт Браут скончался, не дожив до этого события.

\* Гравитационное взаимодействие стоит особняком: независимо от того, какие бывают элементарные частицы, оно описывается общей теорией относительности Эйнштейна.

Зачем нужно поле Энглера—Браута—Хиггса и каковы его свойства? Краткий ответ состоит в том, что симметрии теории микромира — будь то Стандартная модель или какая-то более сложная теория — запрещают элементарным частицам иметь массы, а поле Энглера—Браута—Хиггса нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц. В Стандартной модели — простейшем варианте теории (и только в ней!) все свойства поля Энглера—Браута—Хиггса и, соответственно, бозона Хиггса, за исключением его массы, однозначно предсказываются опять-таки на основе соображений симметрии. Имеющиеся экспериментальные данные согласуются как раз с простейшим вариантом теории, однако эти данные пока довольно скудны, и предстоит длительная работа по выяснению того, как именно устроен новый сектор физики элементарных частиц. Расшифровка этого абзаца требует, конечно, расширения, хотя бы в общих чертах, роли симметрий в физике микромира.

Начнем с того, что напомним общее свойство физических теорий, будь то ньютонова механика, квантовая механика или теория микромира: каждой симметрии соответствует свой закон сохранения. Например, симметрии относительно сдвигов во времени (т.е. тому обстоятельству, что законы физики одинаковы во всякий момент времени) соответствует закон сохранения энергии, симметрии относительно сдвигов в пространстве — закон сохранения импульса, а симметрии относительно поворотов в пространстве (все направления в пространстве равноправны) — закон сохранения углового момента. Законы сохранения можно интерпретировать и как запреты: перечисленные симметрии запрещают изменение энергии, импульса и углового момента замкнутой системы при ее эволюции.

И наоборот, каждому закону сохранения отвечает своя симметрия; это утверждение является точным в квантовой теории. Спрашивается, какая же симметрия соответствует закону сохранения электрического заряда? Ясно, что симметрии пространства и времени, о которых мы только что упомянули, здесь ни при чем. Тем не менее такая симметрия имеется. Дело в том, что помимо очевидных, пространственно-временных симметрий существуют неочевидные, «внутренние» симметрии. Одна из них и приводит к сохранению электрического заряда. Для нас важно, что эта же внутренняя симметрия (только понимаемая в расширенном смысле как калибровочная инвариантность) объясняет и тот факт, что у фотона нет массы. Отсутствие массы у фотона, в свою очередь, тесно связано с тем, что у света могут быть только два типа поляризации — левая и правая.

Чтобы пояснить эту связь между наличием только двух типов поляризации света и отсутствием массы у фотона, отвлечемся на время от разговора о симметриях и напомним, что элементар-

ные частицы характеризуются внутренним моментом вращения — спином, который может быть полуцелым или целым в единицах постоянной Планка  $\hbar$ . Элементарные фермионы (частицы полуцелого спина) имеют спин  $1/2$ . Это электрон  $e$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ , тяжелые аналоги электрона — мюон  $\mu$  и тау-лептон  $\tau$ , их нейтрино  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ , кварки шести типов  $u, d, c, s, t, b$  и соответствующие всем им античастицы (позитрон  $e^+$ , антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ , антикварк  $\bar{u}$  и т.д.).

Частицы целого спина называют бозонами. К ним относится фотон, он имеет спин 1. Единичным спином обладают и глюоны — отдаленные аналоги фотона, отвечающие за взаимодействия между кварками и связывающие их в протон, нейтрон и другие составные частицы. Кроме того, есть еще три частицы спина 1 — электрически заряженные  $W^+$ -,  $W^-$ -бозоны и нейтральный  $Z$ -бозон. О них еще пойдет речь впереди. Ну а частица Хиггса имеет нулевой спин.

Заметим, кстати, что мы только что перечислили все элементарные частицы, имеющиеся в Стандартной модели.

Вернемся к свойствам частиц со спином. Масивная частица спина  $s$  (в единицах  $\hbar$ ) имеет  $(2s + 1)$  состояний с разными проекциями спина на заданную ось (спин — внутренний угловой момент — это вектор, так что понятие о его проекции на заданную ось имеет обычный смысл). Например, спин электрона ( $s = 1/2$ ) в его системе покоя может быть направлен вверх ( $s_z = +1/2$ ) или вниз ( $s_z = -1/2$ ). Бозон  $Z$  обладает ненулевой массой и спином  $s = 1$ , поэтому состояний с разными проекциями спина у него три:  $s_z = +1, 0$  или  $-1$ . Совершенно иначе обстоит дело с безмассовыми частицами. Поскольку они летают со скоростью света, перейти в систему отсчета, где такая частица покоится, нельзя. Тем не менее можно говорить о ее спиральности — проекции спина на направление движения. Так вот, несмотря на то что спин фотона равен единице, таких проекций может быть всего две — вдоль и против направления движения. Это и есть правая и левая поляризации фотона (света). Третье состояние с нулевой проекцией спина, которое обязано было бы существовать, будь у фотона масса, запрещено глубокой внутренней симметрией электродинамики, той самой симметрией, что приводит к сохранению электрического заряда. Таким образом, эта внутренняя симметрия запрещает и существование массы у фотона.

Ключевыми для нас являются, однако, не фотоны, а  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозоны. Эти частицы, открытые в 1983 г. на протон-антипротонном коллайдере  $Sp\bar{p}S$  в ЦЕРНе и задолго до этого предсказанные теоретиками, обладают спином 1 и довольно большой массой:  $W^{\pm}$ -бозоны имеют массу 80 ГэВ (т.е. они примерно в 80 раз тяжелее протона), а  $Z$ -бозон — 91 ГэВ. Свойства  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонов сейчас хорошо известны благодаря в основном экс-

периментам на электрон-позитронных коллайдерах LEP (ЦЕРН) и SLC (SLAC, США) и протон-антипротонном коллайдере Tevatron (Fermilab, США): точность измерений целого ряда величин, относящихся к  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонам, лучше 0.1%. Эти свойства, как и свойства других частиц, прекрасно описываются Стандартной моделью. Последнее замечание относится и к взаимодействиям  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов с электроном, нейтрино, кварками и другими частицами. Эти взаимодействия называются слабыми. Они изучены во всех деталях; один из давно известных примеров их проявления —  $\beta$ -распады мюона, нейтрона и ядер.

Как мы уже говорили, каждый из массивных  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов может находиться в трех спиновых состояниях, а не в двух, как фотон. Тем не менее их взаимодействия с фермионами (нейтрино, кварками, электроном и т.д.) устроены в принципе так же, как взаимодействие фотона. Например, фотон взаимодействует с электрическим зарядом электрона и электрическим током, который создает движущийся электрон. Точно так же  $Z$ -бозон взаимодействует с некоторым зарядом электрона и током, возникающим при движении электрона, только эти заряд и ток не совпадают с электрическими. С точностью до важной особенности, о которой пойдет вскоре речь, аналогия будет полной, если помимо электрического заряда электрону приписать еще и  $Z$ -заряд. Своими  $Z$ -зарядами обладают и кварки, и нейтрино.

Аналогия с электродинамикой простирается еще дальше. Так же, как и теория фотона, теория  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов обладает глубокой внутренней симметрией, близкой к той, что приводит к закону сохранения электрического заряда. В полной аналогии с фотоном, эта внутренняя симметрия запрещает  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонам иметь третью поляризацию, а стало быть, и массу. Вот тут получается нестыковка: симметричный запрет на массу частицы спина 1 действительно работает в случае фотона, а в случае  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов он не работает.

Дальше — больше. Слабые взаимодействия — взаимодействия электронов, нейтрино, кварков и других частиц с  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонами — устроены так, как если бы эти фермионы не имели никакой массы! Дело здесь не в числе поляризаций: и у массивных, и у безмассовых фермионов поляризаций (направлений спина) может быть ровно две. Дело в том, как именно взаимодействуют фермионы с  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонами.

Чтобы пояснить суть проблемы, выключим сначала массу электрона (в теории такое позволено) и рассмотрим воображаемый мир, в котором масса электрона равна нулю. В таком мире электрон летает со скоростью света и может иметь спин, направленный вдоль направления движения или против него. Так же, как и для фотона, в первом случае имеет смысл говорить об электроне

с правой поляризацией, или, короче, о правом электроне, во втором — о левом электроне.

Поскольку мы хорошо знаем, как устроены электромагнитные и слабые взаимодействия (а только в них электрон и участвует), мы вполне способны описать свойства электрона в нашем воображаемом мире. А они таковы. Во-первых, в этом мире правый и левый электроны — две совершенно разные частицы: правый электрон никогда не превращается в левый и наоборот. Действительно, превращение правого электрона в левый на лету запрещено законом сохранения углового момента (в данном случае спина), а взаимодействия электрона с фотоном и  $Z$ -бозоном не меняют его поляризацию. Во-вторых, взаимодействие электрона с  $W^\pm$ -бозонами испытывает только левый электрон, а правый в нем вообще не участвует. Третьей важной особенностью, о которой мы обмолвились выше, оказывается в этой картине то, что  $Z$ -заряды левого и правого электрона различны, левый электрон взаимодействует с  $Z$ -бозоном сильнее, чем правый. Аналогичные свойства имеются и у мюона, и у тау-лептона, и у кварков.

Подчеркнем, что в воображаемом мире с безмассовыми фермионами нет никаких проблем с тем, что левые и правые электроны взаимодействуют с  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонами по-разному, в частности, что «левый» и «правый»  $Z$ -заряды различны. В этом мире левые и правые электроны — это разные частицы, и дело с концом: нас же не удивляет, что разные частицы, например электрон и нейтрино, имеют разные электрические заряды (в данном случае  $-1$  и  $0$ ).

Попробуем теперь включить массу электрона — и немедленно придем к противоречию. Быстро движущийся электрон, скорость которого близка к скорости света, а спин направлен против направления движения, выглядит почти так же, как левый электрон из нашего воображаемого мира. И взаимодействовать он должен почти так же\*. Если это взаимодействие связано с  $Z$ -зарядом, то этот быстрый электрон должен иметь «левое» значение  $Z$ -заряда — такое же, как  $Z$ -заряд левого электрона в нашем воображаемом мире. Однако скорость массивного электрона все-таки меньше скорости света, и всегда можно перейти в систему отсчета, движущуюся еще быстрее. В новой системе направление движения электрона изменится на противоположное, а направление спина останется прежним. Проекция спина на направление движения будет теперь положительной, и такой электрон будет выглядеть

\* В реальном мире для ограниченного (но только ограниченного!) круга процессов так оно и оказывается. Например, взаимодействие быстрого массивного электрона, спин которого направлен против направления движения, с *покоящейся* или *медленно движущейся* мишенью (скажем, атомным ядром) практически не отличается от взаимодействия левого безмассового электрона.

как правый, а не левый\*. Соответственно, и  $Z$ -заряд его должен быть таким же, как у правого электрона из нашего воображаемого мира. Такого не может быть: значение заряда не должно зависеть от системы отсчета. Противоречие налицо. Подчеркнем, что мы пришли к нему, предполагая, что  $Z$ -заряд сохраняется; если заряд не сохраняется, то о его значении для данной частицы и говорить не приходится.

Это противоречие показывает, что симметрии Стандартной модели (для определенности будем говорить о ней, хотя все сказанное относится к любому другому варианту теории) должны были бы запрещать существование масс не только у  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов, но и у фермионов. Причем тут симметрии? При том, что они должны были бы приводить к сохранению  $Z$ -заряда. Измерив  $Z$ -заряд электрона, мы смогли бы однозначно сказать, левый этот электрон или правый. А это возможно только тогда, когда масса электрона равна нулю.

Таким образом, в мире, где все симметрии Стандартной модели реализовывались бы так же, как в электродинамике, все элементарные частицы должны были бы иметь нулевые массы. В реальном мире эти массы есть, значит, с симметриями Стандартной модели что-то должно происходить.

Говоря о связи симметрий с законами сохранения и запретами, мы упустили из виду одно обстоятельство. Оно заключается в том, что законы сохранения и симметричные запреты выполняются только тогда, когда симметрия присутствует явно. Однако симметрии могут быть и нарушенными. Например, в однородном образце железа при комнатной температуре всегда имеется магнитное поле, направленное в какую-то сторону; образец представляет собой магнит. Если бы существовали микроскопические существа, живущие внутри этого магнита, то они бы обнаружили, что не все направления пространства вокруг них равноправны: на электрон, летящий поперек магнитного поля, действует сила со стороны магнитного поля — сила Лоренца, а на электрон, летящий вдоль поля, сила не действует. Стало быть, магнитное поле внутри образца нарушает симметрию относительно вращений в пространстве. В связи с этим внутри магнита не выполняется и закон сохранения углового момента: при движении электрона поперек поля проекция углового момента на ось, перпендикулярную магнитному полю, меняется со временем.

Здесь мы имеем дело со «спонтанным» нарушением симметрии. В отсутствие внешних воздействий (например, магнитного поля Земли) в разных образцах железа магнитное поле может быть на-

правлено в разные стороны, и ни одно из этих направлений не будет предпочтительнее другого. Исходная симметрия относительно вращений по-прежнему имеется, и проявляется она в том, что магнитное поле в образце может быть направлено куда угодно. Но раз уж магнитное поле возникло, появилось и выделенное направление, и симметрия внутри магнита оказалась нарушенной. На более формальном уровне, уравнения, управляющие взаимодействием атомов железа между собой и с магнитным полем, симметричны относительно вращений в пространстве, но состояние системы этих атомов — образца железа — несимметрично. В этом и состоит явление спонтанного нарушения симметрии. Отметим, что мы здесь говорим о наиболее выгодном состоянии, имеющем наименьшую энергию; такое состояние называют основным.

Итак, спонтанное нарушение некоторой симметрии имеет место тогда, когда уравнения теории симметричны, а основное состояние — нет. Слово «спонтанное» употребляют в этом случае в связи с тем, что система сама, без нашего участия, выбирает несимметричное состояние, поскольку именно оно энергетически наиболее выгодно. Из приведенного примера ясно, что если симметрия спонтанно нарушена, то вытекающие из нее законы сохранения и запреты не работают; в нашем примере это относится к сохранению углового момента.

В общих чертах ситуация в физике элементарных частиц похожа на ту, что мы только что описали. Но есть и важные отличия. Во-первых, ни о какой среде наподобие кристаллической решетки атомов железа говорить уже не приходится. Состоянием с наименьшей энергией в природе является вакуум (по определению!). Это не означает, что в вакууме — основном состоянии природы — не может быть однородно «разлитых» полей, подобных магнитному полю в нашем примере. Наоборот, нестыковки, о которых мы говорили выше, свидетельствуют о том, что симметрии Стандартной модели должны быть спонтанно нарушенными, а это предполагает, что в вакууме имеется какое-то поле, обеспечивающее это нарушение. Во-вторых, речь идет не о пространственно-временных, как в нашем примере, а о внутренних симметриях. Пространственно-временные симметрии, наоборот, не должны нарушаться из-за присутствия поля в вакууме. Отсюда следует важный вывод о том, что в отличие от магнитного, это поле не должно выделять никакого направления в пространстве (точнее, в пространственно-временном пространстве), поскольку мы имеем дело с релятивистской физикой). Поля с таким свойством называют скалярными; им соответствуют частицы спина 0. Взаимодействие скалярного поля, «разлитого» в вакууме, с  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонами, электронами и другими фермионами должно приводить к появлению масс у этих частиц.

\* Противоречия с утверждением, сделанным в предыдущей сноске, здесь нет: в новой системе мишень движется быстрее электрона, и в реальном мире взаимодействие электрона с ней существенно отличается от взаимодействия с покоящейся мишенью.

Механизм генерации масс частиц со спином 1 — в природе это  $W^-$ - и  $Z$ -бозоны — за счет спонтанного нарушения симметрии и был предложен в контексте физики элементарных частиц теоретиками из Брюсселя Франсуа Энглером и Робертом Браутом и чуть позже — физиком из Эдинбурга Питером Хиггсом. Произошло это в 1964 г. Они опирались на представление о спонтанном нарушении симметрии (но в теориях без векторных полей, т.е., без частиц спина 1), которое было введено в физику элементарных частиц в 1960—1961 годах в работах Й.Намбу; Й.Намбу и Дж.Йона-Лазинио; В.Г.Вакса и А.И.Ларкина; Дж.Голдстоуна (Йоичиро Намбу получил за это Нобелевскую премию в 2008 г.). Эти работы основывались, в свою очередь, на теории спонтанного нарушения симметрии в конденсированных средах (жидкостях, твердых телах), выдающийся вклад в которую внесли Н.Н.Боголюбов, Л.Д.Ландау и В.Л.Гинзбург.

В отличие от предыдущих авторов, Энглер, Браут и Хиггс рассмотрели теорию (в то время умозрительную), в которой присутствует как скалярное (спин 0), так и векторное поле (спин 1). В этой теории имеется внутренняя симметрия, вполне аналогичная той симметрии электродинамики, которая приводит к сохранению электрического заряда и запрету массы фотона, но, в отличие от электродинамики, внутренняя симметрия спонтанно нарушена однородным скалярным полем, имеющимся в вакууме. Замечательным результатом Энглера, Браута и Хиггса стала демонстрация того факта, что это нарушение симметрии автоматически влечет за собой появление массы у частицы спина 1 — кванта векторного поля.

Довольно прямолинейное обобщение механизма Энглера—Браута—Хиггса, связанное с включением в теорию фермионов и их взаимодействия с нарушающим симметрию скалярным полем, приводит к тому, что массы появляются и у фермионов. Все начинаст становиться на свои места! Стандартная модель теперь получается в результате дальнейшего обобщения путем включения не одного, а нескольких векторных полей — фотона,  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов (глюоны — это отдельная история, они к механизму Энглера—Браута—Хиггса отношения не имеют) — и разного типа фермионов. Последний шаг на самом деле весьма нетривиален; за формулировку полной теории слабых и электромагнитных взаимодействий Стивен Вайнберг, Шелдон Глэшоу и Абдус Салам получили в 1979 г. Нобелевскую премию.

Вернемся в 1964 год. Для анализа следствий своей теории Энглер и Браут использовали довольно вычурный по сегодняшним меркам подход. Наверное, поэтому они не заметили, что наряду с массивной частицей спина 1 эта теория предсказывает существование еще одной частицы — бозона со спином 0. А вот Хиггс заметил,

и сейчас эту новую бесспиновую частицу называют бозоном Хиггса. Подчеркнем, что этот бозон является квантом того самого скалярного поля, которое нарушает симметрию. И в этом его уникальность.

Здесь нужно сделать уточнение. Повторим, что если бы спонтанного нарушения симметрии не было, то  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозоны были бы безмассовыми. Каждый из трех бозонов  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  имел бы две поляризации, как фотон. Итого, считая частицы с разными поляризациями разными, мы бы имели  $2 \times 3 = 6$  типов  $W^\pm$ -,  $Z$ -бозонов. В Стандартной модели  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозоны массивные, у каждого из них по три спиновых состояния, т.е. три поляризации, итого  $3 \times 3 = 9$  типов частиц — квантов полей  $W^\pm$ ,  $Z$ . Спрашивается, откуда взялись три «лишних» типа квантов? Дело заключается в том, что в Стандартной модели необходимо ввести не одно, а четыре скалярных поля Энглера—Браута—Хиггса. Квант одного из них — это бозон Хиггса, открытый в ЦЕРНе. А кванты трех других в результате спонтанного нарушения симметрии как раз и превращаются в три «лишних» кванта, имеющих у массивных  $W^\pm$ -,  $Z$ -бозонов. Искать их смысла нет, они уже давно найдены, коль скоро известно, что  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозоны имеют массу: три «лишних» спиновых состояния  $W^+$ -,  $W^-$ - и  $Z$ -бозонов — это они и есть.

Эта арифметика, кстати, согласуется с тем, что все четыре поля Энглера—Браута—Хиггса — скалярные, их кванты имеют нулевой спин. Безмассовые  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозоны имели бы проекции спина на направление движения, равные  $-1$  и  $+1$ . Для массивных  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов эти проекции принимают значения  $-1$ ,  $0$  и  $+1$ , т.е. «лишние» кванты имеют нулевую проекцию. Три поля Энглера—Браута—Хиггса, из которых эти «лишние» кванты получаются, тоже имеют нулевую проекцию спина на направление движения, просто потому, что их вектор спина равен нулю. Все сходится.

Итак, бозон Хиггса — это квант одного из четырех скалярных полей Энглера—Браута—Хиггса, существующих в Стандартной модели. Три других поедаются (научный термин!)  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонами, превращаясь в их третьи, недостающие спиновые состояния. Самое удивительное в этой истории заключается в том, что сегодня мы понимаем: механизм Энглера—Браута—Хиггса — отнюдь не единственный возможный механизм нарушения симметрий в физике микромира и генерации масс элементарных частиц, а бозон Хиггса мог бы и не существовать. Этому нас учит, в частности, физика конденсированных сред. В ней имеется множество примеров спонтанного нарушения симметрии и разнообразие механизмов этого нарушения. И в большинстве случаев ничего похожего на бозон Хиггса в этих примерах нет.

Ближайшим твердотельным аналогом спонтанного нарушения симметрий Стандартной мо-

дели в вакууме служит спонтанное нарушение внутренней симметрии электродинамики в толще сверхпроводника. Оно приводит к тому, что в сверхпроводнике фотон в определенном смысле обладает массой (как  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозоны в вакууме). Проявляется это в эффекте Мейсснера — выталкивании магнитного поля из сверхпроводника. Фотон не хочет проникать внутрь сверхпроводника, где он становится массивным: ему там «тяжело», ему энергетически невыгодно там находиться (вспомните  $E = mc^2$ ). Магнитное поле, которое можно несколько условно воспринимать как набор фотонов, обладает тем же свойством: оно в сверхпроводник не проникает. Это и есть эффект Мейсснера.

Феноменологическая теория сверхпроводимости — теория Гинзбурга—Ландау — чрезвычайно похожа на теорию Энглера—Браута—Хиггса (точнее, наоборот: теория Гинзбурга—Ландау на 14 лет старше). В теории Гинзбурга—Ландау тоже есть скалярное поле, которое однородно «разлито» по сверхпроводнику и приводит к спонтанному нарушению симметрии. Однако теорию Гинзбурга—Ландау недаром называют феноменологической: она ухватывает, образно говоря, внешнюю сторону явления, но совершенно неадекватна для понимания фундаментальных, микроскопических причин возникновения сверхпроводимости. Никакого скалярного поля в сверхпроводнике на самом деле нет, в нем есть электроны и кристаллическая решетка, а сверхпроводимость обусловлена особыми свойствами основного состояния системы электронов, возникающими благодаря взаимодействию между ними.

Не может ли подобная картина иметь место и в микромире? Не может ли быть так, что никакого фундаментального скалярного поля, «разлитого» в вакууме, нет, а спонтанное нарушение симметрий вызвано совершенно иными причинами? Если рассуждать чисто теоретически и не обращать внимания на экспериментальные факты, то ответ на этот вопрос — утвердительный. Примером может служить так называемая «модель техницвета», предложенная в 1979 г. уже упоминавшимся Стивеном Вайнбергом и независимо Леонардом Сасскиндом. В ней нет никаких фундаментальных скалярных полей, нет и бозона Хиггса. Вместо этого есть много новых элементарных частиц, по своим свойствам напоминающих известные кварки. Взаимодействие между этими новыми частицами и приводит к спонтанному нарушению симметрий и генерации масс  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонов. С массами известных фермионов, например электрона, дело обстоит хуже, но и эту проблему можно решить за счет усложнения теории.

Внимательный читатель может задать вопрос: «А как же с изложенными выше аргументами, говорящими, что нарушать симметрию должно именно скалярное поле?» Лазейка здесь в том, что это скалярное поле может быть составным, в том смысле, что соответствующие ему частицы-кванты не элементарны, но состоят из других, элементарных, частиц.

В физике частиц составные скалярные и псевдоскалярные поля встречаются. Самый известный пример — поля, описывающие  $\pi^+$ -,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ -мезоны, состоящие из кварков и антикварков. Похожая ситуация и предполагается в модели техницвета. При этом три бесспиновых кванта, которые поедаются  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонами и становятся их недостающими спиновыми состояниями, имеют близкую аналогию с  $\pi^+$ -,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ -мезонами. Только соответствующий энергетический масштаб — не 100 МэВ, как в физике  $\pi$ -мезонов, а несколько ТэВ. В такой картине ожидается существование множества новых составных частиц — аналогов протона, нейтрона и т.д. — с массами в области нескольких ТэВ. Сравнительно легкий бозон Хиггса в ней, наоборот, отсутствует. Еще одна особенность модели в том, что  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозоны оказываются в ней отчасти составными частицами, поскольку, как мы сказали, некоторые их компоненты аналогичны  $\pi$ -мезонам. Это должно было бы проявляться во взаимодействиях  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонов.

Именно последнее обстоятельство привело к тому, что модель техницвета (по крайней мере в ее изначальной формулировке) была отвергнута задолго до недавнего экспериментального обнаружения бозона Хиггса: точные измерения характеристик  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозонов на несуществующих уже  $e^+e^-$ -коллайдерах LEP и SLC не согласуются с предсказаниями модели. Открытие же бозона Хиггса окончательно поставило крест на модели техницвета. Красивая теория была разгромлена упрямыми экспериментальными фактами! Тем не менее ряду теоретиков идея о составных скалярных полях представляется более привлекательной по сравнению с теорией Энглера—Браута—Хиггса, использующей элементарные скалярные поля. Конечно, после открытия в ЦЕРНе идея о «составленности» оказалась в более трудном положении, чем раньше: если эта частица составная, она должна достаточно успешно мимикрировать под элементарный бозон Хиггса. И все же поживем — увидим, что скажут по этому поводу эксперименты на Большом адронном коллайдере, в первую очередь более точные измерения характеристик нового бозона. ■

© Академик **В.А.Рубаков**,  
Институт ядерных исследований РАН,  
Москва

## По химии — М.Карплус, М.Левитт и А.Уоршел

**Н**обелевскую премию по химии за 2013 год получили три исследователя — Мартин Карплус, Майкл Левитт и Ари Уоршел — «за разработку многомасштабных моделей комплексных химических систем».

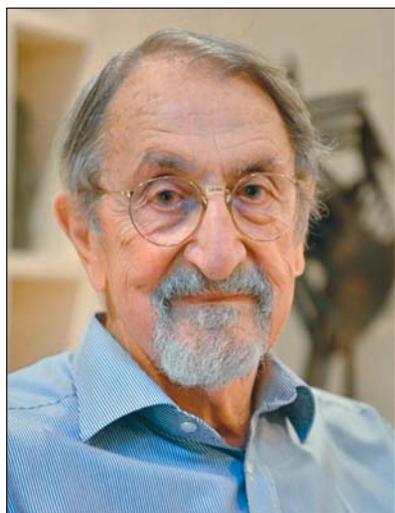
Мартин Карплус (Martin Karplus), австрийский и американский подданный, родился 15 марта 1930 г. в Вене, откуда в 1938 г. семья бежала от нацистов в США. Образование получил в Гарвардском колледже, затем работал под руководством Л.Полинга в Калифорнийском технологическом институте, где в 1953 г. стал доктором философии по химии. Член Национальной академии наук США, Американской академии искусств и наук, иностранный член Нидерландской академии искусств и наук, Лондонского королевского общества и Международной академии квантово-молекулярных наук. Работает в Гарвардском университете.

Майкл Левитт (Michael Levitt), гражданин США, Великобритании и Израиля, родился 9 мая 1947 г. в Претории (южноафриканском городе). В 1967 г. окончил Королевский колледж в Лондоне со степенью бакалавра по физике. В 1967—1968 гг. стажировался у Шнеура Лифсона в Институте Вейцмана (в Реховоте). В 1971 г. защитил докторскую диссертацию по биофизике, в 1974—1979 гг. занимался структурными исследованиями в лаборатории молекулярной биологии в Кембриджском университете. С 1987 г. — профессор в области структурной биологии в Стэнфордском университете. Член Лондонского королевского общества,

Национальной академии наук США и Американской академии искусств и наук.

Ари Уоршел (Arieh Warshel), гражданин США и Израиля, родился 20 ноября 1940 г. в кибуце Сде-Нахум около Бейт-Шеана (в то время территория Подмандатной Палестины). После службы в армии (вернулся Уоршел в ранге капитана) он поступил в Технион в Хайфе, который окончил в 1966 г. со степенью бакалавра. В следующем году, работая в Институте Вейцмана, стал магистром, а в 1969 г. — доктором философии по химической физике. С 1972 по 1976 г. стажировался в Гарвардском университете, затем вернулся в Институт Вейцмана и одновременно работал в Лаборатории молекулярной биологии Кембриджского университета. Член Национальной академии наук США и Королевского химического общества.

Мы наблюдаем гигантское ускорение в расшифровке пространственной структуры биологических молекул. Началось все в 50-х годах прошлого века с пионерных работ М.Перутца, предложившего трехмерную модель гемоглобина, и знаменитых исследований Ф.Франклин, М.Уилкинса, Д.Уотсона и Ф.Крика по определению структуры ДНК. Сегодня невозможно себе представить прогресс в любой области биохимии или молекулярной биологии без знания пространственной конфигурации молекул. Но немногим известно, что оно в огромной степени зависит от методов и программ математического моделирования структуры и динамики сложных многоатомных молекул. Дело в том, что ни один сего-



Мартин Карплус.



Майкл Левитт.



Ари Уоршел.

дняшний способ изучения их трехмерного строения не дает исчерпывающей информации. Требуется специальные методы, чтобы рассчитывать энергии взаимодействия атомов и возможные конфигурации полимерной цепи с целью понять, какие из предположительных структур лучше соответствуют экспериментальным данным.

Сегодня спектр приложений теоретических методов и модельных расчетов быстро расширяется. Все большее значение приобретает исследование динамики биологических макромолекул, развиваются экспериментальные способы изучения динамики отдельной молекулы и ее частей. Стремительно растет разрешение световой и электронной микроскопии. Анализ результатов таких исследований теперь больше опирается на теоретические методы и молекулярные расчеты, чем на структурные исследования. Поиск новых лекарств, выяснение механизмов внутриклеточных процессов — все это сегодня невозможно без применения молекулярнодинамических расчетов. Работы нобелевских лауреатов, проведенные в начале 70-х годов прошлого века, входят в число пионерных исследований, с которых началось создание эффективных компьютерных программ для решения подобных задач.

Первые шаги в квантовом моделировании сделал Карплус, чья исследовательская группа работала над этим в Кембриджском университете. В начале 1970-х годов у Карплуса уже был опыт в квантовохимических расчетах, и в это время в его лабораторию прибыл Уоршел, который стремился создать вычислительную модель больших молекул. По словам Уоршела, они хотели понять, как работает белок, а для этого нужно было «навести порядок» в моделировании.

Но создать модель непросто, ведь одна-единственная молекула белка состоит из десятков тысяч атомов. Все мы хорошо знаем, что мир атомов и молекул подчиняется квантовой механике. Квантовомеханический расчет любой молекулы всегда даст самый точный результат. Но такие расчеты очень трудоемки, для их выполнения необходимы фантастические вычислительные ресурсы. Даже самые современные суперкомпьютеры много месяцев рассчитывают структуры относительно небольших молекул (размером в несколько тысяч дальтонов). Дело в том, что квантовая механика рассматривает отдельно электроны и ядра, что приводит к огромному числу переменных. Но во многих случаях применение классических физических моделей, в которых атомы отображены в виде шариков, может дать приблизительные результаты, имеющие вполне приличную точность. Эти расчеты занимают на порядки меньше времени, потому что атомы (и даже их группы) могут рассматриваться как простые физические объекты (шарики). Да и сами уравнения классической физики существенно проще для расчетов, чем квантовомеханические. Поэтому главной за-

слугой новых лауреатов было создание гибридных подходов, сочетающих как квантовомеханические, так и классические представления. Иными словами, Карплус, Левитт и Уоршел сумели разработать способы, которые делали взаимодействие разных по описанию частей молекулы физически осмысленным.

Известно, что теоретическое описание и математическое моделирование макромолекул базируются главным образом на четырех типах описания.

Главная зона, в которой протекают основные химические процессы (скажем, активный центр фермента), рассматривается квантовохимическими методами. За их разработку В.Кон (Walter Kohn) и Дж.Попл (John Pople) получили Нобелевскую премию в 1998 г. А вообще вся квантовая химия, естественно, основывается на классических работах по квантовой механике в первой половине 20-го столетия. Эта область знания создана трудами величайших физиков, за что они удостоились Нобелевских премий: это М.Планк (премия 1918 г.), Н.Бор (1922), Л. де Бройль (1929), В.Гейзенберг (1932), Э.Шрёдингер и П.Дирак (1933).

Теория, описывающая зону, окружающую главную, состоит из нескольких частей. Для описания внутримолекулярных взаимодействий вводится интрамолекулярное силовое поле. Сегодняшние модели силовых полей восходят к работам 1946 г., когда три группы исследователей независимо предложили свои варианты такого описания [1–3]. Оно основывается на законе Кулона и Ван-дер-Ваальсовых взаимодействиях (Ван-дер-Ваальс получил Нобелевскую премию в 1910 г., а Кулону не повезло — родился слишком рано). В 1946 г. о применении компьютеров для этих целей еще говорить не приходилось, первые компьютерные программы, позволяющие оптимизировать пространственную структуру молекулы, были разработаны Н.Л.Эллинджером только в 1965–1967 гг. [4, 5]. В методах, которые сначала использовались для моделирования простых органических молекул, идет поиск координат атомов, соответствующих минимуму потенциальной энергии всех силовых взаимодействий.

Упрощенную версию силового поля разрабатывали Дж.Немети и Х.Шерага для статистикомеханических расчетов в поиске структур, соответствующих минимуму энергии [6]. Начиная с этого времени квантовомеханические расчеты стали регулярно применяться в разработке интра- и интрамолекулярных потенциалов для сложных молекулярных систем. Важную роль в развитии этой области сыграли С.Лифсон (S.Lifson) и А.Уоршел, создавшие метод согласованного силового поля [7]. Другой лауреат — Левитт — и Лифсон впервые применили этот метод для минимизации энергии структуры белка [8]. Еще один хорошо известный пример теоретически сконструированного силового поля был опи-

сан в 1976 г. [9]. Это потенциал (он назван именами предложивших его авторов: Matsuoka—Clementi—Yoshimine — МСУ) для взаимодействий вода—вода, полностью рассчитанный квантовомеханическим способом. МСУ был использован для создания классического силового поля с членами, описывающими кулоновские и Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия.

Преимущество методов, основанных на классическом потенциале, состоит в том, что энергия легко рассчитывается, и поэтому можно изучать большие системы атомов. Однако у таких подходов есть и существенный недостаток — возможность расчета только небольших возмущений в положении атомов. Следовательно, эти методы непригодны для исследования химических реакций, поскольку в реакционном процессе возникают новые молекулы. С квантовохимическими методами ситуация другая. Они годятся для расчетов систем, где молекулы образуются или разрушаются, но требуют невероятных объемов памяти и машинного времени. Поэтому реально могут рассчитываться только небольшие молекулы.

Объединение методов, когда квантовомеханически рассчитывается только небольшая область активного центра, а окружающая зона описывается классическими методами, сталкивается с проблемой выбора правильной конформации этого окружения. Один вариант выбора восходит к Эллинджеру. Он предложил минимизировать энергию системы и использовать только конформацию, соответствующую минимуму энергии. Другой подход вытекает из работ Немети и Шераги, применивших методы статистической физики (такие как метод молекулярной динамики или метод Монте-Карло), которые генерируют множество конформаций с правильными статистическими весами [10].

Важность работ новых лауреатов не в том, какая стратегия используется для выбора изучаемой конфигурации. Они фокусируются на другом — как аккуратно и экономно (в отношении расчетного времени) оценить изменения в энергии реальной системы, в которой значительные геометрические перестройки или реорганизация в электронной конформации происходят в относительно небольшой области молекулы, а окружающая часть меняется слабо. Первый шаг в решении проблемы был сделан Уоршелом и Карплусом [11]. Они очень удачно и точно рассчитали  $\pi$ -электронные и колебательные спектры ретиналя и ряда схожих молекул. В разработанной ими программе расчет  $\sigma$ -электронов и ядер проводился классическим методом, тогда как для  $\pi$ -электронов использовался квантовохимический [12, 13] с поправкой на взаимодействие с окружением.

Это была первая работа, в которой удалось показать, что для достаточно сложной химической системы можно создать гибридный метод, сочета-

ющий достоинства классического и квантовохимического подходов. Этот метод может применяться только для плоских молекулярных систем, подобных ретиналю, поскольку в нем используются соображения о симметрии молекулы, которые естественным образом отделяют  $\pi$ -электроны от  $\sigma$ -электронов и ядер. Спустя несколько лет, в 1976 г., Уоршел и Левитт убедились, что это ограничение не принципиально [14]. Они показали, что можно создать общую схему выделения электронов, которые рассчитываются квантовыми методами из всей системы электронов, рассчитываемых классическими методами. Чтобы такая процедура могла работать, нужно было сконструировать модель энергетического сопряжения взаимодействия классической и квантовой подсистем, а кроме того — сочетать их с водным окружением, которое описывалось в рамках приближения диэлектрической среды. Все это Уоршел и Левитт сделали и описали в статье «Диэлектрическая, электростатическая и стерическая стабилизация иона карбония в реакции с лизоцимом» [14].

Примерно в это же время была опубликована еще одна работа Левитта и Уоршела, посвященная фолдингу\* бычьего панкреатического ингибитора трипсина [15]. Они сделали важный шаг, который позволяет изучать даже большие системы. Введением псевдоатомов авторы добились упрощения рассматриваемой молекулы: полипептидная цепь моделировалась в виде цепочки, а боковые остатки аминокислот в ней — как сферы подходящих размеров.

В сообщении Нобелевского комитета сказано, что современные методы позволяют моделировать не только простые химические реакции, в которых участвуют молекулы из небольшого числа атомов, но и реакции белков, углеводов, ДНК и РНК в живых организмах. Нобелевские лауреаты стояли у истоков создания программ, которые используются для понимания и предсказания течения химических реакций. Сегодня без компьютерного моделирования не обходится ни одно серьезное исследование или открытие, компьютерные модели живых систем играют важнейшую роль в работах на стыке химии и биологии. Сейчас компьютер воспринимается как нечто само собой разумеющееся, для химиков он — такой же важный экспериментальный инструмент, как пробирка, а максимально приближенная к реальности симуляция (имитация) помогает прогнозировать результат традиционных экспериментов.

Работы нобелевских лауреатов 2013 г. дали толчок как дальнейшему развитию более точных методов для расчета сложных молекул, так и массовому применению развитых подходов к разнообраз-

\* Фолдинг — сворачивание белков (и других биологических макромолекул) из развернутой конформации в «нативную» форму.

разным прикладным задачам, начиная с «посадки» малых молекул на белки с целью создания новых лекарств и кончая задачами гетерогенного катализа и расчетами спектров сложных молекул. Важный вклад в это развитие был внесен не только последующими работами лауреатов [16–18], но и исследованиями многих других ученых. Из них в первую очередь нужно упомянуть Дж.Гао (J.Gao) [19], Ф.Масераса (F.Maseras) и К.Морокуму (K.Morokuma) [20], У.Ч.Сингха (U.Ch.Singh) и П.Коллмана

(P.Kollman) [21], Х.М.Сенна (H.M.Senn) и В.Тиеля (W.Thiel) [22]. Их работы привели к очень продуктивному сотрудничеству между теоретиками и экспериментаторами, что позволило решить ряд ранее непостижимых задач. ■

© Ф.И.Атауллаханов,

доктор биологических наук  
Московский государственный университет  
им.М.В.Ломоносова

## Литература

1. Westheimer F.H., Mayer J.E. The theory of the racemization of optically active derivatives of diphenyl // J. Chem. Phys. 1946. V.14. P.733–738.
2. Hill T.L. On Steric Effects // J. Chem. Phys. 1946. V.14. P.465–473.
3. Dostrovsky J., Hughes E.D., Ingold C.K. Mechanism of substitution at a saturated carbon atom. Part XXXII // J. Chem. Soc. 1946. P.173–194.
4. Allinger N.L., Miller M.A., Chow L.W. et al. The calculated electronic spectra and structures of some cyclic conjugated hydrocarbons // J. Amer. Chem. Soc. 1965. V.87. P.3430–3435.
5. Allinger N.L., Miller M.A., van Catledge F.A., Hirsch J.A. Conformational analysis. LVII. The calculation of the conformational structures of hydrocarbons by the Westheimer-Hendrickson-Wiberg method // J. Amer. Chem. Soc. 1967. V.89. P.4345–4357.
6. Nümethy G., Scheraga H. Theoretical determination of sterically allowed conformations of a polypeptide chain by a computer method // Biopolymers. 1965. V.3. P.155–184.
7. Lifson S., Warsbel A. Consistent force field for calculations of conformations, vibrational spectra, and enthalpies of cycloalkane and n-alkane molecules // J. Chem. Phys. 1968. V.49. P.5116–5128.
8. Levitt M., Lifson S. Refinement of protein conformations using a macromolecular energy minimization procedure // J. Mol. Biol. 1969. V.46. P.269–279.
9. Matsuoka O., Clementi E., Yoshimine M. CI study of the water dimer potential surface // J. Chem. Phys. 1976. V.66. P.1351–1362.
10. Frenkel D., Smit B. Understanding molecular simulations. San Diego, 1996.
11. Warsbel A., Karplus M. Calculation of ground and excited state potential surfaces of conjugated molecules. I. Formulation and parametrization // JACS. 1972. V.94. P.5612–5625.
12. Pariser R., Parr R. A Semi-empirical theory of the electronic spectra and electronic structure of complex unsaturated molecules. I // J. Chem.Phys. 1953. V.21. P.466–471.
13. Pople J.A. Electron interaction in unsaturated hydrocarbons // Trans. Faraday Soc. 1953. V.49. P.1375–1385.
14. Warsbel A., Levitt M. Theoretical studies of enzymic reactions: dielectric, electrostatic, and steric stabilization of the carbonium ion in the reaction of lysozyme // J. Mol. Biol. 1976. V.103. P.227–249.
15. Levitt M., Warsbel A. Computer simulation of protein folding // Nature. 1975. V.253. P.694–698.
16. Field M.J., Basb P.A., Karplus M. Mixed quantum mechanical/molecular mechanical (QM/MM) potentials // J. Comp. Chem. 1990. V.11. P.700–733.
17. Messer B.M., Roca M., ... Warsbel A. Multiscale simulations of protein landscapes: Using coarse-grained models as reference potentials to full explicit models // Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics. 2010. V.78. P.1212–1227.
18. Mukberjee S., Warsbel A. Realistic simulations of the coupling between the protomotive force and the mechanical rotation of the F0-ATPase // PNAS. 2012. V.109 (37). P.14876–14881.
19. Gao J. Reviews in computational chemistry / Eds K.B.Lipkowitz, D.B.Boyd. VCH, N.Y. 1996. V.7. P.119–185.
20. Maseras F., Morokuma K. IMOMM — a new integrated ab-initio plus molecular mechanics geometry optimization scheme of equilibrium structures and transition states // J. Comput. Chem. 1995. V.16. P.1170–1179.
21. Singh U.Ch., Kollman P.A. Combined abinitio quantum-mechanical and molecular mechanical method for carrying out simulations on complex molecular-systems — applications to the CH<sub>3</sub>Cl + Cl<sup>-</sup> exchange-reaction and gas-phase protonation of polyethers // J. Comput. Chem. 1986. V.7. P.718–730.
22. Senn H.M., Thiel W. QM/MM methods for biomolecular systems // Angew. Chem. Int. Ed. 2009. V.48. P.1198–1229.

## По физиологии или медицине — Дж.Ротман, Р.Шекман и Т.Зюдоф

В октябре 2013 г. Нобелевский комитет объявил о присуждении премии в области физиологии или медицины Дж.Ротману, Р.Шекману и Т.Зюдофу «за открытие механизмов регуляции везикулярного транспорта — главной транспортной системы наших клеток».

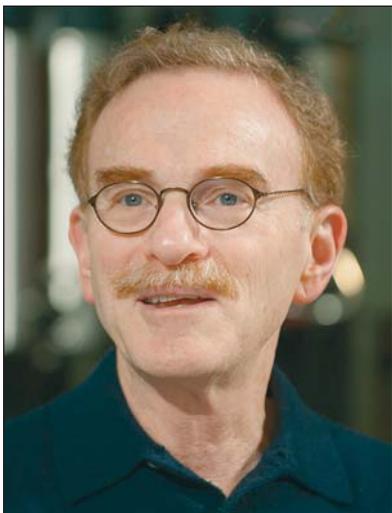
Рэнди Шекман (Randy W.Schekman) родился в 1948 г. в американском городе Сент-Поле (штат Миннесота). В 1971 г. окончил Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе, в 1975 г. получил степень доктора философии в Стэнфордском университете, причем руководителем Шекмана был Артур Корнберг (Arthur Kornberg), лауреат Нобелевской премии 1959 г. В настоящее время Шекман — профессор факультета молекулярной и клеточной биологии в том же Калифорнийском университете, но в Беркли, а также сотрудник Медицинского института Говарда Хьюза (в Чевинг-Чейзе, штат Мэриленд) и главный редактор журнала «eLife».

Джеймс Ротман (James E.Rothman) родился в 1950 г. в Хэверхилле (штат Массачусетс). Степень бакалавра получил в Йельском университете в 1971 г., доктора философии в области биохимии — в Гарвардском университете в 1976 г., затем работал несколько лет в Массачусетском технологическом институте, а с 1978 г. — в Стэнфордском университете, где и начал исследования, удостоенные Нобелевской премии. В 1988—1991 гг. Ротман работал в Принстонском университете, затем — в Онкологическом центре им. А.П.Слоуна и

Ч.Ф.Кэттеринга и Колумбийском университете. С 2008 г. профессор Ротман руководит факультетом клеточной биологии Йельского университета. Лауреат премии Альберта Ласкера за фундаментальные медицинские исследования (2002).

Томас Зюдоф (Thomas C.Südhof) родился в 1955 г. в немецком городе Гёттингене. Учился в Рейнско-Вестфальском техническом университете Ахена, Гарвардском и Гёттингенском университетах; степень доктора медицины получил в 1982 г. В 1983 г. переехал в США и начал работать в Медицинском центре Техаса (в Далласе). В 1991 г. стал исследователем в Медицинском институте Говарда Хьюза, а в 2008 г. занял должность профессора молекулярной и клеточной физиологии в Стэнфордском университете. Лауреат премии Кавли (2010) и премии Альберта Ласкера за фундаментальные медицинские исследования (2013).

Что же такое везикулярный транспорт, какова его роль в жизнедеятельности отдельной клетки и организма в целом? Еще со школьных времен многие знают слова «пиноцитоз», «фагоцитоз», «секреция». Все это частные случаи везикулярного транспорта. К сожалению, даже для студентов магистратуры, обучающихся по биологическим направлениям, эти термины не связываются в систему. Между тем везикулярный транспорт — один из таких же базовых внутриклеточных процессов, как транскрипция, трансляция, репарация, синтез белка и т.д., без которых жизнь клетки невозможна.



Рэнди Шекман.



Джеймс Ротман.



Томас Зюдоф.

По определению, *везикулярный транспорт* — это перенос белков (их в этом случае еще называют «грузом») от одного компартмента\* к другому посредством мембранных пузырьков, или везикул (от лат. *vesicule* — пузырек). Строго говоря, это определение не совсем верно, так как в нем упоминаются лишь белки, причем только в качестве груза. Между тем везикулярным транспортом переносятся в основном те из них, которые так или иначе ассоциированы с мембраной, а также образующие ее липиды, одновременно играющие роль и пассажиров, и средств передвижения.

Важность механизмов везикулярного транспорта в том, что они сопряжены с постоянной сортировкой белков и липидов. В результате одни из них исключаются из органеллы, другие — так называемые *резидентные* липиды и белки, определяющие специализацию компартмента, — в ней удерживаются. Таким образом поддерживается уникальный липидно-белковый состав каждой органеллы. Казалось бы, они должны быть стабильными, на самом же деле это чрезвычайно динамичные образования, в которых потоки везикул на «входе» и «выходе» уравновешены. Для наглядности представим себе управляемый перекресток: перед ним постоянно скапливаются автомобили (особенно в час пик), однако с каждым переключением светофора их состав меняется.

В организации везикулярного транспорта, действительно, просматривается много аналогий с дорожным движением, или трафиком (недаром в англоязычной литературе используется термин «vesicular traffic»). Множество везикул перемещаются в разных направлениях как внутри клетки, так и вне ее, доставляя биомолекулы точно по адресу. Чем не дорожно-транспортная сеть со сложными многоуровневыми развязками, по которым автомобили мчатся в пересекающихся направлениях, вливаются с боковых магистралей в шоссе, перестраиваются, уступая место другим, и исчезают вдали. Направление и цель движения каждой машины хорошо известны ее водителю, но абсолютно неведомы стороннему наблюдателю, для которого все эти перемещения выглядят хаотичными, а не строго упорядоченными.

Как и чем обеспечивается упорядоченность движения везикул в клетке? Известно два основных их потока. Первый — это путь вновь синтезированных мембранных белков и липидов из эндоплазматического ретикулума к цис-цистерне аппарата Гольджи. Далее, по мере продвижения грузов от цис-стороны к транс-цистерне, происходят их модификации, позволяющие достичь полной функциональной активности (т.е. «созреть»). Этот отрезок пути получил название *биосинтетического*. На транс-стороне, представленной сетью ту-

булярных отростков, грузы сортируются и упаковываются в везикулы, отправляемые по разным адресам. Если пункт конечного назначения — плазматическая мембрана, то говорят об *экзоцитозном*, или *секреторном*, пути. Однако грузы из аппарата Гольджи могут отправляться и к другим органеллам, нуждающимся в замене старых компонентов на новые или в увеличении площади своей поверхности. Весь этот путь называется *антероградным*, или *прямым*. Его результатом может быть как поддержание порядка домашнего хозяйства клетки (англ. *housekeeping functions*), так и экспорт секреторируемых белков, часто работающих на большом удалении от места их секреции.

Второй основной путь, *эндоцитозный*, имеет противоположную направленность и поэтому называется также *ретроградным*. Пути попадания компонентов внешней среды в клетку достаточно разнообразны: так, известно, что ионы и небольшие молекулы (например, глюкозы или аминокислот) могут переноситься непосредственно через мембрану с помощью каналов или белков-транспортеров. Однако крупные макромолекулы и частицы используют механизмы везикулярного транспорта. Почему? Видимо, потому, что они позволяют осуществлять отбор нужных макромолекул, регулировать интенсивность процесса и точно определять пункты конечного назначения внутри клетки. Селективность обеспечивают рецепторы к определенным белкам или группам белков. Такие рецепторы на мембране способны «вылавливать» из окружающей среды макромолекулы, находящиеся там в очень низких ( $10^{-8}$ – $10^{-12}$  М) концентрациях. С помощью высокоспецифичных рецепторов с клеткой связываются, например, трансферрин (белок, приносящий внутрь ионы железа) или пептидные ростовые факторы и гормоны, стимулирующие разные сигнальные пути. Все они быстро эндоцитируются клеткой (*интернализуются*), концентрируясь предварительно в определенных участках мембраны, где формируются пузырьки, которые отшнуровываются затем внутрь клетки. Эти пузырьки называются *эндосомами*, и они тоже способны сортировать груз, возвращая его на мембрану (рециклирование), направляя на деградацию в лизосомы, или в нетронутым виде перенося на противоположную сторону клетки и выбрасывая наружу (транцитоз).

Приведенное описание должно привести к выводу, что груз каким-то образом знает о том, в какие пузырьки он должен упаковываться, а везикулы имеют четкое представление о конечной цели своего путешествия. Кроме того, как уже упоминалось, компоненты мембран как-то умеют сортироваться на те, которые будут исключены из состава компартмента (грузы), и те, которые должны остаться и функционировать в данной мембране (резидентные компоненты).

Несмотря на то что само понятие о везикулярном транспорте сформировалось еще до 70-х го-

\* Компартменты (от англ. *compartment* — отсек, отделение, ячейка) — области в клетке, окруженные билипидным слоем мембраны, или органеллы. — *Примеч. ред.*

дов прошлого века, а транспортные пути многих белков были описаны еще раньше, отсутствовало понимание того, каким образом происходит сортировка и обеспечивается специфичность упаковки и слияния везикул. Долгое время считали, что общих механизмов для разных путей и грузов не существует. Однако с начала 80-х годов в результате работы многих лабораторий начала вырисовываться картина, которая показала универсальность регуляции всех стадий везикулярного трафика.

Так, стало понятно, что каждый этап любого пути можно подразделить на элементарные стадии. Все начинается на мембране-доноре, где формируется инвагинация, или «почка» (bud), в которую отсортировываются молекулы-грузы. Также в состав мембраны будущего транспортного пузырька включаются регуляторные белки, которые будут определять дальнейшее направление движения и адрес доставки. После отпочковывания сформировавшейся везикулы она перемещается к компартменту-мишени (англ. target — цель, мишень), как правило, используя цитоскелет в качестве «рельсов». На следующем этапе везикула «проверяет» правильность доставки и паркуется (заякоривается) на мембране-мишени. Затем их мембраны сливаются и груз попадает в целевой компартмент. Казалось бы, на этом история заканчивается. Однако если бы это было так, то после нескольких раундов слияний компартмент-донор просто прекратил бы свое существование либо не смог бы больше формировать пузырьки из-за истощения регуляторных белков. Поэтому на завершающей стадии любого этапа необходим фактически зеркальный процесс рециклирования — регуляторные белки мембраны-донора упаковываются в очередные пузырьки на мембране-мишени и отправляются в обратный путь.

Оказалось также, что каждая стадия регулируется определенной группой белков. Формирование транспортной везикулы опосредуется так называемыми белками окаймления (англ. coat proteins), специфичными для каждого этапа и выполняющими две функции: искривления мембраны для образования пузырька и взаимодействия с грузом. Как правило, мембранные грузы или их рецепторы также активно участвуют в определении пути: действительно, ведь должен же пассажир сказать извозчику, куда его везти? Поэтому регуляторные белки, определяющие узнавание и заякоривание, обычно прямо или опосредованно взаимодействуют с грузами. Именно в этой области и развернулась деятельность Рэнди Шекмана [1–3]. Он сосредоточился на анализе биосинтетического пути, используя в качестве модели дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Выбор оказался очень удачным, поскольку можно было быстро отобрать мутантные штаммы. Относительная легкость генетических манипуляций с дрожжами позволила провести гигантский объем работ и идентифицировать гены (*sec*) и соответствующие им белки (*Sec*), отвечающие за формиро-

вание окаймления на эндоплазматическом ретикулеуме и нацеливание везикул на мишень. Более того, Шекман сформировал достаточно полную картину молекулярных событий, регулирующих сборку окаймления, механизм сортировки им грузов и последующей его разборки.

Джеймс Ротман также взялся за изучение механизмов везикулярного транспорта, что неудивительно, поскольку он попал в ту же лабораторию Корнберга, которую несколькими годами ранее покинул Шекман. Однако в отличие от него Ротман работал на клетках млекопитающих, и его внимание привлекла одна из самых загадочных проблем, а именно регуляция слияний везикул с мембранами-мишенями. К тому времени уже были идентифицированы белки Rab — малые ГТФазы, практически не способные, несмотря на название, гидролизовать ГТФ (гуанозинтрифосфат) без помощи белков семейства GAP (GTPase-activating proteins — протенин-активатор ГТФазы). После гидролиза замену ГДФ на ГТФ (т.е. возвращение Rab-белка в исходное состояние) осуществляют белки семейства GEF (guanine nucleotide exchange factors — факторы обмена гуаниловых нуклеотидов). Работы с Rab-белками начали развиваться раньше исследований Ротмана, и было описано много их замечательных свойств. Наиболее активно эти работы проводились в Европейской молекулярно-биологической лаборатории (Гейдельберг) [4]. Оказалось, что Rab-белок способствует слиянию мембран, только пока связан с ГТФ. Стало ясно, что эти малые ГТФазы могут выполнять роль таймеров, определяющих тот период времени, когда слияния возможны. Наличие на разных компартментах определенного набора Rab-белков позволяло говорить об их роли в определении специфичности слияния. Однако эти исследования зашли в тупик, поскольку объяснить, каким именно образом маленький Rab-белок регулирует само слияние, исследователи не могли.

И тут появились первые работы Ротмана, в которых он сообщил об идентификации белкового комплекса, опосредующего специфическое слияние мембран. Комплекс состоял из мультимерного цитоплазматического белка NSF (*N*-ethylmaleimide sensitive factor — *N*-этилмалеимид-чувствительного фактора, обладающего АТФазной активностью), SNAP (*s*oluble NSF-*a*ttachment *p*rotein — растворимого NSF-присоединяющего протеина) и двух SNARE (*S*NAP *r*eceptors — SNAP рецепторов), один из которых ассоциирован с мембраной везикулой, а другой — с мембраной-мишенью (*v*- и *t*-SNARE соответственно) [5]. Такие аббревиатуры выбраны не случайно: «to snap» в переводе с английского означает «хватать, фиксировать», а «snare» — «ловушка».

Ключевые игроки здесь — пара комплементарных SNARE, способных образовывать прочный комплекс и тем самым фиксировать две мембраны на очень близком (менее 10 нм) расстоянии. В се-

рии изящных опытов было установлено, что такой комплекс необходим и достаточен для слияния мембран. Эта модель разрешила основные проблемы: мембраны сливаются только при наличии двух совершенно определенных рецепторов, специфичных для каждого этапа, а реорганизация липидов происходит благодаря энергии, выделяемой при гидролизе АТФ с участием NSF; SNAP же обеспечивает фиксацию комплекса и рекрутирование NSF. Казалось бы, можно праздновать победу.

Однако, как это часто бывает со слишком очевидными и логичными схемами, продолжение исследований привело к неожиданным осложнениям: во-первых, выяснилось, что в слиянии участвуют не два, а четыре SNARE. Во-вторых, оказалось, что один и тот же SNARE может формировать комплексы более чем на одном этапе транспортного пути. Опять возникла проблема обеспечения специфичности. К тому же было обнаружено, что само слияние происходит быстрее, чем гидролиз АТФ с участием NSF, и, таким образом, его энергия не может обеспечивать слияние. В рядах «снэристов» некоторое время царил замешательство, но по мере накопления и анализа новых данных эти вопросы были разрешены, и в настоящее время схема слияния выглядит так: v-SNARE, локализованный на транспортной везикуле, узнает комплекс из трех t-SNARE, связанных с мембраной-мишенью. Именно в такой комбинации этот комплекс из четырех SNARE наиболее прочен. При контакте SNARE изгибаются таким образом, что силы, развивающейся при изгибе, достаточно для сближения мембран и их последующего слияния, поэтому SNARE-комплекс часто называют «мышцами» слияния. После слияния все четыре белка оказываются в одной мембране, и их комплекс надо разобрать для того, чтобы v-SNARE можно было вернуть обратно в мембрану-донор. Именно тогда и рекрутируется SNAP, приводящий за собой NSF, который и тратит энергию гидролиза АТФ на разборку комплекса.

Понятно, что для достижения специфичности взаимодействия на каждом транспортном этапе можно не полностью менять состав комплекса, а использовать какой-нибудь один из трех t-SNARE на всех этапах, обеспечивая тем самым целостность всего пути и не позволяя везикулам отклониться от маршрута. Именно такой принцип, как оказалось, и используется в действительности.

Интересно, что Шекман в работах на дрожжах идентифицировал белки, которые впоследствии оказались SNARE биосинтетического пути. Их структура до чрезвычайности схожа с соответствующими SNARE млекопитающих, описанных Ротманом. Высокая степень консервативности регуляторных белков (и не только SNARE), обслуживающих везикулярный транспорт (от дрожжей до человека), показывает, насколько важен этот процесс для нормального функционирования клетки.

Позднее был выяснен и механизм работы Rab-белков, чему способствовала идентификация их белковых партнеров, взаимодействующих с ГТФ-связанной формой. Среди них были выявлены длинные белки с большими линейными участками либо комплексы белков, имеющие линейный размер более 100 нм. Эти белки (с плохо адаптируемым к русскому языку английским названием tether — привязь, коновязь) оказались способны узнавать определенные участки на мембране-мишени и обеспечивать первоначальное закоривание, облегчая дальнейшее формирование SNARE-комплексов. Можно сказать, что Rab-белки работают как ковбои, «заарканывая» нужную мембрану с помощью tethers и подтягивая везикулу к мембране-мишени. Кроме того, Rab-белок способен удалять с одного из t-SNARE протекторный белок, предотвращающий несанкционированные слияния. Таким образом, точность слияний определяется по крайней мере на трех уровнях: Rab-белка, белка протектора SNARE и самого SNARE-комплекса.

Нужно отметить, что роль Rab-белков оказалась гораздо шире их участия в регуляции слияния мембран. Так, они способствуют взаимодействию везикулы с моторными белками, обеспечивая ее перемещение по микротрубочкам или микрофиламентам в определенном направлении. Кроме того, Rab-белки позволяют поддерживать доменную организацию везикул и компартментов, пространственно разграничивая несколько различных процессов, идущих на мембране одной органеллы. Их способность «включаться» и «выключаться» под влиянием внешних сигналов позволяет координировать транспортные и сигнальные процессы, которые должны протекать «в нужном месте в нужное время». В связи с этим Rab-белки часто называют «топ-менеджерами» клетки. Чрезвычайно меткое название, учитывая то обстоятельство, что Rab-белки не делают ничего «своими руками», а лишь сообщают другим молекулам, когда и чем им заниматься, а когда можно и отдохнуть. По моему мнению, коллектив под руководством М.Зериала (Институт молекулярной клеточной биологии и генетики им.Макса Планка, Дрезден) с полным правом мог претендовать на Нобелевскую премию, поскольку в результате его исследований стали понятны более общий принцип организации и роль транспортных процессов в различных клетках.

Третий номинант премии, Томас Зюдоф, известен своими исследованиями молекулярных механизмов функционирования синапсов. Что объединяет его с Шекманом и Ротманом? Везикулярный транспорт. Ибо синаптические пузырьки, содержащие нейротрансмиттер, выбрасывают его в синаптическую щель в результате слияния с пре-синаптической мембраной, опосредуемого специфичными для нейронов SNARE-комплексами, а после этого подвергаются эндоцитозу и вновь накапливают нейротрансмиттер для следующих актов слияния. Мало кто знает, что многие нейро-

токсины, вызывающие паралич, разрушают непосредственно тот или иной синаптический SNARE. Зюдоф сосредоточился на роли кальция в регуляции слияния, поскольку было известно, что потенциал действия активирует потенциал-зависимые кальциевые каналы в синапсе, в результате чего и происходит выброс нейромедиатора [6, 7]. Кальций, поступая внутрь синапса, связывается с белком синаптоагмином, который в результате изменяет конформацию, как бы погружаясь в мембрану, и облегчает таким образом не только формирование комплекса SNARE, но и реорганизацию липидного бислоя. Зюдоф также сделал многое для понимания того, как формируются различные синапсы и как нейромедиаторы передают сигнал соседним клеткам [8–10].

\* \* \*

Признаюсь, выбор Нобелевского комитета, оценившего важность исследований везикулярного транспорта, несколько удивил, но удивил приятно. Как мне кажется, даже в профессиональной среде на Западе значение этого аспекта функционирования клетки явно недооценивается, причем даже специалистами, занимающимися внутриклеточной сигнализацией. В России дела обстоят еще печальнее. Оживление интереса к везикулярному транспорту как к системному процессу, попытки выяснения общих механизмов его регуляции пришлось на 90-е годы XX в. — времена, когда перспективы выживания российской науки были весьма туманными. Неудивительно, что в нашей стране число групп и лабораторий, занимающихся непосредственно изучением этой области клеточной биологии, можно пересчитать по пальцам. Тем временем продолжает накапливаться все больше данных о том, что сигнальные рецепторы могут генерировать различные сигналы в зависимости от того, ре-

циклируют ли они на мембрану или направляются на деградацию в лизосомы. Синдромы, связанные с иммунными и неврологическими нарушениями, вызваны мутациями в генах, кодирующих белки-регуляторы везикулярного транспорта. Такие генетические заболевания, как болезни лизосомного накопления, вызваны нарушениями механизмов сортировки или слияния мембран. Правильная пигментация кожи или такое явление, как мимикрия, также имеют в основе везикулярный трафик в меланоцитах. Первый ряд иммунной защиты организма от бактериальных инфекций представлен фагоцитами, роль которых — интернализировать бактерию и доставить ее в лизосомы для переваривания. Бактерии, в свою очередь, в процессе эволюции выработали механизмы защиты от деградации, используя регуляторы везикулярного транспорта клетки «в корыстных целях». Столь же выгодным для себя образом способны модифицировать везикулярный транспорт токсины и вирусы, попадающие в клетку путем эндоцитоза.

Я думаю, что присуждение Нобелевской премии 2013 г. за работы в области везикулярного транспорта привлечет внимание большого числа исследователей к этой тематике. Она очень важна для понимания принципов координации многочисленных сигнальных каскадов в клетке. Очевидно также, что детальные знания о молекулярной основе везикулярного трафика в норме и при патологиях делают возможным определение новых перспективных мишеней воздействия и разработку новых терапевтических подходов для лечения или коррекции патологий. ■

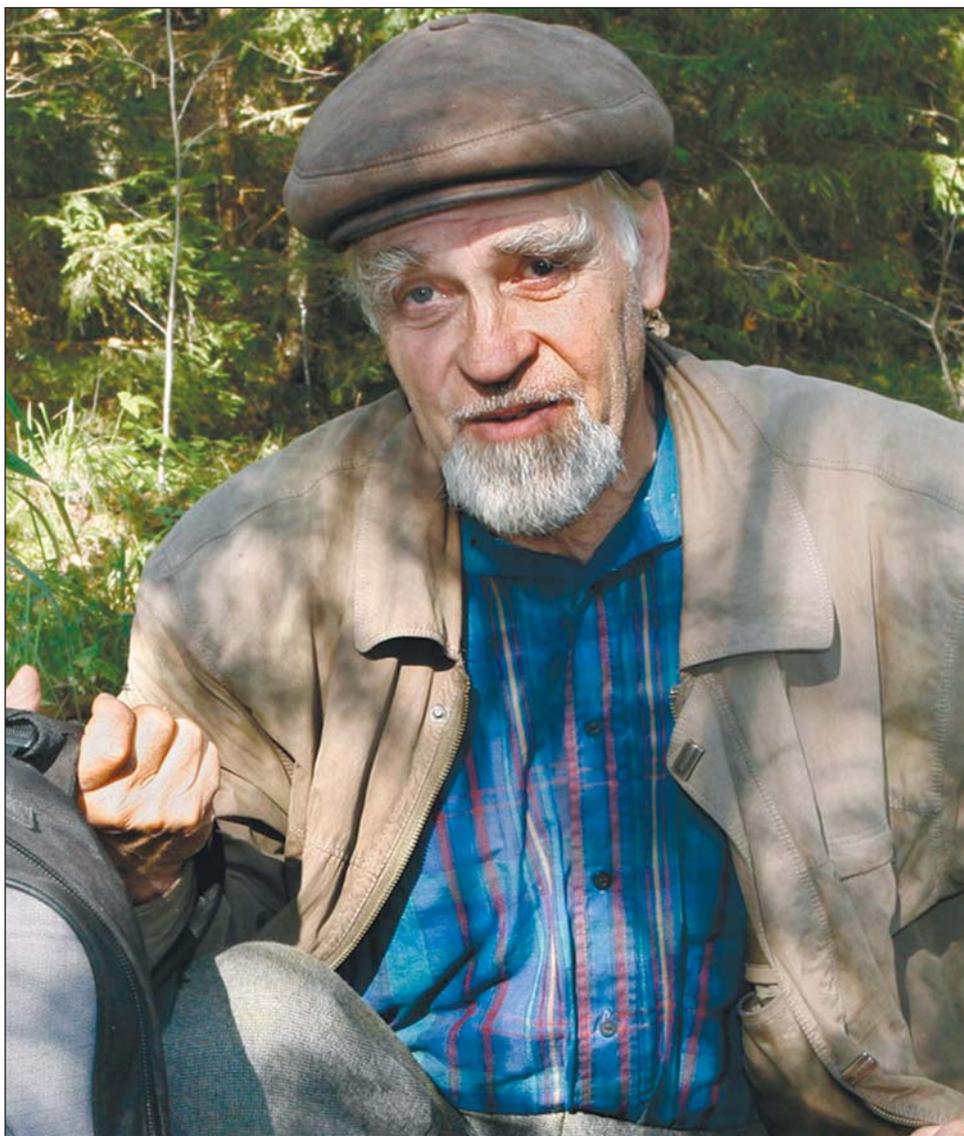
© **Е.С.Корнилова,**

доктор биологических наук,  
Институт цитологии РАН,  
Санкт-Петербург

## Литература

1. *Novick P., Schekman R.* Secretion and cell-surface growth are blocked in a temperature-sensitive mutant of *Saccharomyces cerevisiae* // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 1979. V.76. №4. P.1858—1862.
2. *Novick P., Field C., Schekman R.* Identification of 23 complementation groups required for post-translational events in the yeast secretory pathway // *Cell.* 1980. V.21. №1. P.205—215.
3. *Novick P., Ferro S., Schekman R.* Order of events in the yeast secretory pathway // *Cell.* 1981. V.25. №2. P.461—469.
4. *Chavrier P., Gorvel J.P., Stelzer E. et al.* Hypervariable C-terminal domain of rab proteins acts as a targeting signal // *Nature.* 1991. V.353. №6346. P.769—772.
5. *Sollner T., Whiteheart S.W., Brunner M. et al.* SNAP receptors implicated in vesicle targeting and fusion // *Nature.* 1993. V.362. P.318—324.
6. *McMahon H.T., Missler M., Li C., Südhof T.C.* Complexins: cytosolic proteins that regulate SNAP receptor function // *Cell.* 1995. V.83. P.111—119.
7. *Reim K., Mansour M., Varoqueaux F. ... Südhof T.C.* Complexins regulate a late step in Ca<sup>2+</sup>-dependent neurotransmitter release // *Cell.* 2001. V.104. P.71—81.
8. *Perin M.S., Fried V.A., Mignery G.A. ... Südhof T.C.* Phospholipid binding by a synaptic vesicle protein homologous to the regulatory region of protein kinase C // *Nature.* 1990. V.345. P.260—263.
9. *Geppert M., Goda Y., Hammer R.E. ... Südhof T.C.* Synaptotagmin I: a major Ca<sup>2+</sup> sensor for transmitter release at a central synapse // *Cell.* 1994. V.79. P.717—727.
10. *Fernandez-Chacon R., Königstorfer A., Gerber S.H. ... Südhof T.C.* Synaptotagmin I functions as a calcium regulator of release probability // *Nature.* 2001. V.410. P.41—49.

## ОН «ОТКРЫВАЛ ГЛАЗА ДУШИ» Валерий Иванович Булавинцев



Уже больше года назад, 27 октября 2012 г., ушел из жизни Валерий Иванович Булавинцев, и «Природа» оскудела — на ее страницах не стало поэтических очерков о природе, о птицах, которыми он был страстно увлечен. Научные интересы Валерия Ивановича лежали далеко от орнитологии, но где бы он ни был, всегда снимал птиц — в северных краях и на Южном ледовом континенте, в горах Кавказа, в степи и в водно-болотных угодьях, по соседству с домом. А потом рождались рассказы, не вымученно — по наитию. Они и остались нам на память вместе с фотографиями, сделанными этим замечательным и равнодушным человеком. Мы знаем его лишь как автора, а ведь о нем могли бы, видимо, рассказать многие — и о многом. Но откликнулись только двое...

# Искренний и естественный в мыслях и действиях

Н.П.Васильева,

кандидат биологических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт охраны природы

Знаменское-Садки,

Москва

Сейчас практически каждый специалист-эколог знает, что означает «рекультивация». А в 70-х годах это понятие только формировалось в нашей стране. И Институт охраны природы фактически стал инициатором, разработчиком и координационным центром этого направления. В составе сформировавшегося коллектива лаборатории рекультивации были ботаники, лесоводы, почвоведы. Уже начались комплексные исследования «лунных пейзажей» — отвалов, открытых и часто токсичных разработок Подмосковного угольного бассейна в Тульской обл. Организовался стационар. Все было ново и безумно интересно. Но стало очевидно, что нужны зоологи. И вот пришел Валерий Иванович, покинув лабораторию охотоведения, возможно, более близкую ему как профессионалу-зоологу. Тем не менее, полный энтузиазма, он необыкновенно быстро включился в комплексные работы, исследуя практически все группы животных на отвалах — птиц, мелких млекопитающих, земноводных, беспозвоночных. Все делалось своими руками. Мы уже смотрели под ноги, чтобы не наступить на бесчисленные канавки, ловушки, учетные площадки. Заведующая лабораторией, поддерживая наши научные изыскания, все же требовала практических рекомендаций. Особенно долго «сопротивлялись» зоологи. Их можно было понять, поскольку подобного опыта не было ни в стране, ни за рубежом. Но в конце концов Валерий Иванович предложил интересные решения, которые стали частью обязательных рекомендаций при биологической рекультивации. Надо сказать, что его работа была фактически первой в этой области и стала темой кандидатской диссертации. Ссылки на нее всегда можно найти в статьях и монографиях по рекультивации.

Можно вообразить, как было тоскливо смотреть на нарушенные экосистемы профессионалу-зоологу, ведь стихия Валерия Ивановича — естественные и разнообразные ландшафты. Их он повидал немало, работая зоологом в разных экспедициях. Изучал животный мир на Земле Франца Иосифа, Новой Земле, Северной Земле, Новосибирских о-вах и, думаю, остро чувствовал красоту и могущество Севера. Трижды участвовал в антарктических экспедициях. Прекрасный рассказчик, тонкий наблюдатель, готовый жертвовать временем и удобствами ради поиска интересных объектов, — это он. Увлеченность и полная отдача душевных сил проявлялись в любом деле. Невозможно представить Валерия Ивановича отдыхающим. Он всегда был чем-то занят — чтением, изучением английского языка; сам, без учебников, осваивал немецкий, французский; что-то мастерил. В свое время собрал машину, добыв изначально четыре колеса. И хотя она страшно тарахтела, но все же на территории институтского парка продемонстрировала вполне приемлемую скорость. Он знал и умел очень многое, и это обнаруживалось порой случайно, когда к нему обращались за советом. Наверное, он был счастлив, когда нашел для себя то, что было ему по душе. Прекрасные фотографии и десятки рассказов о природе написаны столь живо и увлекательно, что нельзя оторваться. К сожалению, они не собраны в одну книгу, а опубликованы в разных хорошо известных журналах. И только скромный «самиздат» с чудесным названием «Там, где живут зимородки» в полной мере одарит читателей талантом автора. Неугомимость, доброжелательность, искренность и естественность в помыслах и действиях делали Валерия Ивановича внутренне свободным человеком, а значит, близким к Природе, которой он поклонялся. ■

В. И. Булавинцев

## Там, где живут зимородки



• РАССКАЗЫ • ОЧЕРКИ •  
• ИЗ ДАЛЬНИХ СТРАНСТВИЙ ВОЗВРАТЯТЬСЯ •  
• ПРОСТО О РАЗНОМ •

© Васильева Н.П., 2014

# Страстный фотоохотник

В.В.Забугин

Москва

*Крохотным пятнышком жизни теплится наша Земля в необъятных просторах Вселенной. Непостижимое чудо существования чужого мира неуловимой бездонности враждебного космоса. Мы редко задумываемся над этим, нам некогда! Занятые своими делами и проблемами, часто ли открываем глаза души, чтобы оглянуться на себя, что мы на этом свете и для чего! С детства, со сказок, привыкли надеяться, что добро сильнее зла, а так ли в реальной жизни? А ведь от ответа сегодня зависит судьба нашей планеты и всего, что дышит и существует на ней. Все мы больны одним общим недугом: излишней уверенностью в своем праве вершить судьбу окружающего нас мира Природы. Все чаще среди людей раздаются трезвые голоса, а не самоубийство ли эта самоуверенность, не кратчайшая ли дорога к гибели рода человеческого? Не пора ли нам, каждому живущему под солнцем в этом чудесном многоцветном мире, задать себе вопрос — что я есть на весах добра и зла.*

*Кончается время, когда человечество целиком зависело от капризов Природы. Теперь, на-*

*оборот, колыбель нашей жизни, окружающий нас мир в нашей власти, к сожалению, так часто неразумной.*

Такой текст мы с вдовой В.И.Булавиной Еленой Иосифовной нашли в его бумагах. С нами уже нет этого неординарного и в то же время скромного человека, профессионального биолога, фотоохотника, понимающего Природу, — Валерия Ивановича Булавицы. По природе он был очеркистом — с легким характером и легким пером. Обычно тяжеловесная автобиография у него превратилась в краткий, вполне очерковый рассказ «О себе».

*Рассказывать о себе непросто, а уж писать — и подавно. Начну сначала. Родители мои познакомились на фронте. Еще не рожденным совершил я первое свое путешествие на военном самолете из Подмосковья в Сибирь, на родину мамы, где и появился на свет в городе Новосибирске 4 августа 1944 года. Это путешествие, наверное, и определило мою судьбу, поскольку позже всю жизнь мотался по экспедициям.*

*Когда война закончилась, по вызову папы мама со мной на руках (мне в ту пору еще года не исполнилось) приехала в Москву. С тех пор я москвич. С 10-летнего возраста увлекся животным миром, да так им всю жизнь и занимаюсь. В молодости, до армии, ездил по стране в самостоятельные экспедиции, а закончив в начале 70-х институт по специальности биолога-охотоведа, стал работать зоологом, сначала в Институте охраны природы, а позже в Академии наук. Защитил кандидатскую диссертацию. Позже работал в высокоширотной Арктике — на Земле Франца-Иосифа, на Новой Земле, Северной Земле, на о.Вайгач, на Новосибирских островах. Три года подряд участвовал в Советской антарктической экспедиции. Побывал на западе и востоке Антарктиды, на станциях Мирный, Лазаревская, Молодежная, Прогресс, Оазис Бангера.*

*С 1997 года стал писать рассказы и очерки о животных. Пронес через всю жизнь страсть к фотоохоте.*



За очередной съемкой. С длиннофокусным объективом аппарат держать трудно, и В.И. нашел выход — закрепил его на «прикладе», который смастерил из капа. Здесь и далее фото автора (за исключением специально указанных)



Возле столика, сооруженного для зимней подкормки серых куропаток.

Увлеченным фотоохотником и запомнился мне Валерий Иванович. Мне довелось общаться с ним в последний десяток лет его жизни. Познакомились мы 11 лет назад, в недолго просуществовавшем Клубе фотоохотников при Союзе охраны птиц России. Мы, несколько увлеченных фотоохотой человек, собирались вечером в пустой штаб-квартире Союза и делились удачами, обменивались идеями, строили планы. Нас тогда было немного, наверное, потому, что получение снимков оказывалось довольно трудоемким и непредсказуемым процессом — без тщательной подготовки редко получался хороший результат. Валерий Иванович первым предложил оставить «кабинетные разговоры» и встречаться в поле, в лесу, ездить на фотосъемки вместе. Во многом благодаря ему состоялась первая наша вылазка в Кузьминский лесопарк.

Занимаясь фотосъемкой диких птиц второй десяток лет, всю информацию о птицах я выуживал из книг и научных публикаций. Ни разу до этой вылазки мне не приходилось общаться с профессиональными биологами в поле, за делом. И вот теперь такая возможность представилась, я мог узнать от самого ученого о разных тонкостях наблюдений за животными, познакомиться с его богатым опытом фотосъемок. В Кузьминском лесопарке



А это пара птиц, прилетевших за угощением.

Фото В.И.Булавинцева

зимой в черноольшанниках постоянно держался черный дятел — желна, в марте уже строили гнезда ястребы-тетеревятники. Валерий Иванович рассказал мне о своих встречах и наблюдениях за этими птицами, говорил о мечте вновь снять иволгу. Саму птицу и ее гнездо я нашел в следующий же год, и Валерий приехал в Сергиево-Посадский район сразу, как только узнал о моей находке. Уже тогда он печатался в журналах. Мы быстро нашли общие темы, сошлись с ним во многих взглядах на фотоохоту и научно-популярную журналистику.



Возле скрадка на Люберецких полях фильтрации. Сюда В.И. ездил снимать водно-болотных птиц — куликов, лысух, камышниц, чаек и крачек.

Булавицев щедро делился опытом работы над текстами, что помогло мне позже подготавливать свои статьи в журналы.

Общались мы с ним по телефону часто — два-четыре раза в неделю, а первая наша совместная, долго длившаяся работа началась случайно. Недалеко от своего дома поздней осенью он увидел на снегу четыре следочка серых куропаток. Запомнив это место на пустыре, стал их прикармливать, как домашних кур, — то пшена им выложит, то хлебных крошек. Зимой диким курочкам голодно, семена трав скрыты под толстым снежным покрывалом, зеленых побегов не видно, вот и стали приходить куропатки на место прикормки все чаще, а потом даже ежедневно. Пробовали мы их фотографировать. Птицы не боялись съемочной палатки и объективов, щелчков затвора и вспышек. Построили рядом стационарное укрытие, из которого можно было снимать птиц в любое время года. Подкормка продолжалась даже весной. В конце лета голод утоляли уже два выводка, и мы построили

еще один подкормочный столик, надеясь привлечь соседнюю стайку куропаток. Но они появились только через год. Валерий Иванович ежедневно ходил на заснеженный пустырь, чтобы успеть высыпать корм до появления куропаток вечером.

Все наши подопечные осмеливались приходить на подкормку лишь после заката солнца — место ведь было довольно людное. Тем не менее уже три выводка, от 12 до 22 птиц, приходили, как по расписанию, к нашим укрытиям. Без потерь пережили куропатки и особенно тяжелое время, когда на Москву обрушился «ледяной дождь». Потом мы специально освобождали от снега небольшие участки, чтобы куропатки могли копать в мерзлой земле и искать осыпавшиеся семена. Четыре года мы приходили морозными вечерами на пустырь и, спрятавшись в укрытии, наблюдали диких куропаток. Но потом началось «окультуривание» городского пространства, траву выкосили, и куропатки перестали появляться — их местообитание разрушил наступающий город. За все время мы увидели формирование пар и вос-



Кавказский улар. В первую поездку, в 2009 г., в Кабардино-Балкарский заповедник В.И. не смог подобраться к улару, чтобы заснять его крупным планом, это удалось в 2011-м.

Фото В.И.Булавицева

питание потомства, засняли купание в пыли и зимние сплоченные стаи этих птиц.

Став пенсионером, Валерий Иванович предался только одной страсти — фотоохоте на пернатых. Он готов был отправиться куда угодно, если там были птицы, о которых мечтал, поэтому и ездил по всей стране. Но и недалеко от дома находил интерес. Есть там Черное озеро, к которому мы отправлялись весной и летом. Густо заросший берег был раем для десятков пар чомг, черношейных поганок, лысух, камышниц, пастушков, погонышей, всевозможных уток, цапель и разной птичьей мелочи. Очень скоро стало ясно, что сфотографировать этих птиц можно только из укрытия. Мы построили несколько стационарных шалашей-скрадков в разных местах на берегу, настелили проходы к ним через тростники и замаскировали наши укрытия. Мы подходили к ним незаметно, скрываясь в зарослях, и могли спокойно наблюдать за обитателями водоема. Те птицы, что плавали по водной глади, привыкли к виду этих построек и совершенно не обращали на них внимания, а чайки часто использовали их как наблюдательные посты. Именно в одном из этих скрадков произошел с Валерием Ивановичем случай, чуть не закончившийся трагедией.

Мы не раз ездили на глухариные и тетеревиные тока. Никакие трудности его не смущали, и он готов был мириться с любыми личными неудобствами, достигая своей (или нашей) цели. Однажды он даже поехал, не собираясь фотографировать сам, с другими фотографами в Окский заповедник. В марте на нечищенных грунтовых дорогах снега — «по пояс» и, чтобы добраться до глухариного токовища с грузом, нам пришлось «топтать лыжню», поочередно сменяясь на протяжении 6 км. Было необходимо заранее установить съемочные палатки, чтобы глухари привыкли к ним. Валерий Иванович на равных сменялся и пробивал лыжню (замечу, первым идти всегда сложнее), хотя на время самих съемок он планировал совсем другую, далекую экспедицию.

Если бы не он, не его заразительная энергия и инициатива, его яркие устные рассказы о горах Кавказа, я бы никогда не увидел улара и кавказского тетерева, не узнал об удивительном стенолазе и неуловимых альпийской завирушке и пестром каменном дрозде. А страсть к фотосъемке заставляла Валерия Ивановича каждую зиму придумывать новые экспедиции, которые он то отвергал, то вновь загорался и мечтал о путешествиях. Особенно неравнодушен он был к горным птицам. В последнюю нашу экспедицию в Теберду, оставляя нас с Михаилом Родионовым (видеооператором, снимающим дику природы России) далеко позади, без усталости ходил по горам в поисках краснобрюхой горихвостки, стенолаза и пестрого каменного дрозда. Даже в 2012 г. он успел побывать в Тебердинском заповеднике, на биостанции «Чистый лес», на озере Маньч. Фотоархив В.И. огро-



Кавказский тетерев, прилетевший на токовище. Нам пришлось подниматься на 2500 м, чтобы заснять токующих птиц.  
Фото В.И.Булавинцева

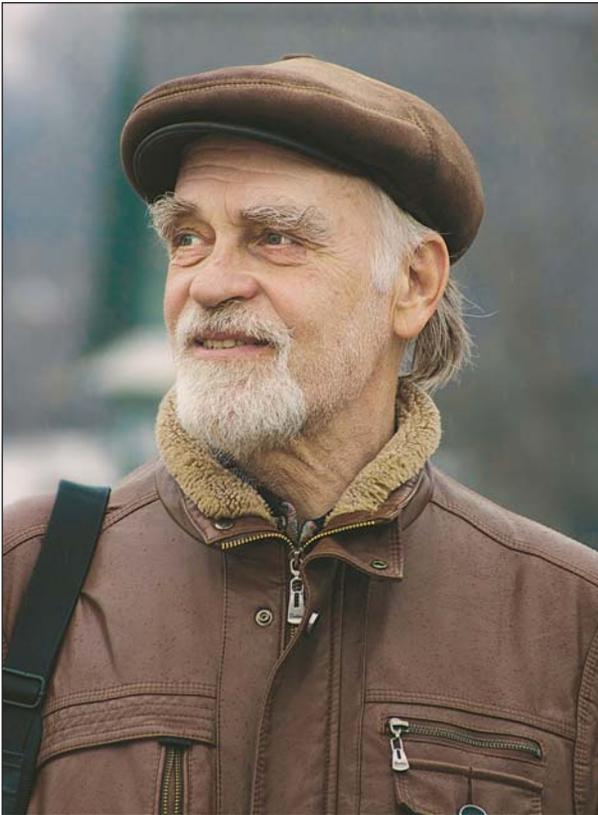
мен, и некоторые из его работ уникальны, ведь качественные фотоснимки, например, кавказского улара и кавказского тетерева можно пересчитать по пальцам одной руки.

В публикациях В.И. воспевал природу России. В очерках, которые поистине были поэзией в прозе, он выплескивал накопившиеся эмоции и переживания, напоминал о губительном влиянии человека на окружающий его мир, рассказывал о жизни птиц и зверей, змей и беспозвоночных. Валерий Иванович написал более 80 очерков и рассказов, опубликованных в разных журналах: «Природе», «В мире животных», «Муравейнике», «Свирели», «Охоте», «National Geographic». Рассказы Валерия Ивановича неизменно пользовались популярностью как у самых маленьких подписчиков журнала «Свирель», так и ученых мужей академического издания «Природа».

Статьи ему давались легко, он писал их в минуты вдохновения. Не раз В.И. говорил, что не может писать по заказу, тексты, как он сказал как-то мне, «идут сами, откуда-то изнутри». Многие журнальные публикации он свел в книгу, которая, к сожалению, вышла слишком маленьким, «самиздатовским» тиражом. Электронную версию книги В.И. отдал в СОПР (Союз охраны птиц России), и ее можно прочитать в Интернете\*.

Один небольшой рассказ опубликован не был, потому что В.И. мне отдал его для книги о фото-

\* [http://www.rbcu.ru/PDF/vib\\_verst1v\\_final.pdf](http://www.rbcu.ru/PDF/vib_verst1v_final.pdf)



В заказнике «Чистый лес», в гостях у друга в апреле 2012 г.  
Фото А.А.Юмалова

охоте, где я собирался посвятить отдельную главу рассказам о страшных и смешных случаях, что происходят с фотоохотниками во время съемок. Он не раз вспоминал с улыбкой случай, когда недавно построенный скрадок выгорел дотла, и я просил его записать все, что произошло в тот злополучный день. Вот его рассказ.

**Как нескучно можно испить чай в одиночестве**

День начинался как обычно. Пришел на озеро к обеду. Жара. Прошлогодний тростник, солнцем высушенный, стеной стоит до самого уреза воды, шелестит на весеннем ветру. Чайки озерные на плесе маячат. Скрадок, что устроили с товарищем, тоже фотографом-анималистом, стоит на месте. Четыре кола, в ил воткнутых, щит под ноги, и все это обернуто сухой пыльной мешковиной, а снаружи еще сухим тростником укрыто, для пущей маскировки. Уютно внутри, вид на залив озерный, тростником отороченный. Перед скрадком, метрах в шестидесяти, в тростнике гнезда лысухи, краквы и чомги. Птицы рядом. Пососедски устроились. Мирно живут.

Бежит время, солнце в спину шпарит. Поработал немного — то чайки подплывут, то чирок-трескунок из камышей явится. Как обычно, одним словом. Если есть терпение, обязательно

что-то снимешь, причем каждый раз разное. Но в этот раз все иначе вышло. Кто бы мог предвидеть, что дальше будет?

Был у меня с собой баллончик газовый, с горелкой. Недавно купил и в степи на съемках дрофы проверил. Удобная вещь, пламя абсолютно не видное, горит без цвета и запаха, только гудит исправно, американская горелка, качественная. Чайку выпить захотелось, тем более что в рюкзаке сыр, хлеб и конфеты к чаю припасены. Налил в жестяную кружку воды, не ту, что в озере, а из дома принесенную, запалил горелку — красота!

Вода в кружке уже побелела, вот-вот вскипит. Да вот незадача, затихла горелка, газ кончился. Баллоном давно пользовался, шесть раз с собой в поле брал. А чая так хочется, страсть! Совсем невтерпеж. Поболтал баллончик — есть еще газ, плещется на донышке. Наклонил его, открыл — шипит, бежит газ.

Хорошо, думаю, сейчас я горелку боком поверну, глядишь и вскипит вода. Секунды две прошло, сижу в тапочках, сапоги-бродни, в которых по сплавице в скрадок шел, в стороне лежат, в них сидеть жарко. В одной руке боком баллон держу с горячей горелкой, в другой — кружку. Передо мной камера на штативе стоит, продукты к чаю в уголке приготовлены. Секунды три прошло, не больше, вдруг вижу: по мешковине, спереди и по бокам скрадка, желтые зайчики засверкали, много и сразу, а там следом ухнуло и пламя. Порохом скрадок полыхнул, споро и разом. Еле успел камеру, сапоги и рюкзак наружу в тростники выложить, сам «выкатился» следом. Жар от горящего скрадка такой, что в трех метрах стоять невмочь. Кругом тростник сухой, а скрадок свечкой с воем и треском полыхает. Вытоптанные вокруг него остатки тростника пламенем заниматься начали. Кинулся грязью мокрой, тиной их забрасывать. Особо не разбежишься в тапочках-то, ведь грязь кругом. Но повезло, дальше скрадка огонь не пошел, на мое счастье ветра не было...

Скрадок в несколько минут сгорел дотла. Биноколь, что внутри остался, в комок сплавился, только стекла, помутневшие, вывороченные боком торчат — такой жар внутри был. Продукты сгорели, чай пропал.

В запасе у нас с товарищем материал был припасен для другой засидки. Часа за полтора сделал новый скрадок, на месте сгоревшего. Посидел в нем немного, подплывают птицы, огонь и моя суета мало их беспокоили. Чего обо мне не скажешь. Попил чайку, надолго запомнится... Теперь если в тростники, так только с термосом.

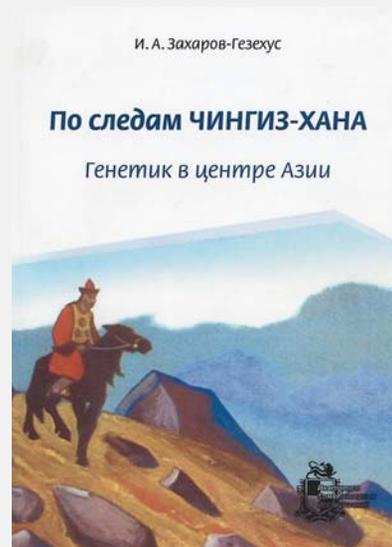
Валерий Иванович Булавинцев был необыкновенно приятный в общении человек, тонко чувствующий природу, настоящий интеллигент. Вообще ученых я представляю именно такими и благодарю судьбу, что она свела меня с одним из них — замечательным и неравнодушным. ■

## Генетика. География

**И.А.Захаров-Гезехус.** ПО СЛЕДАМ ЧИНГИЗ-ХАНА. ГЕНЕТИК В ЦЕНТРЕ АЗИИ. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 84 с.

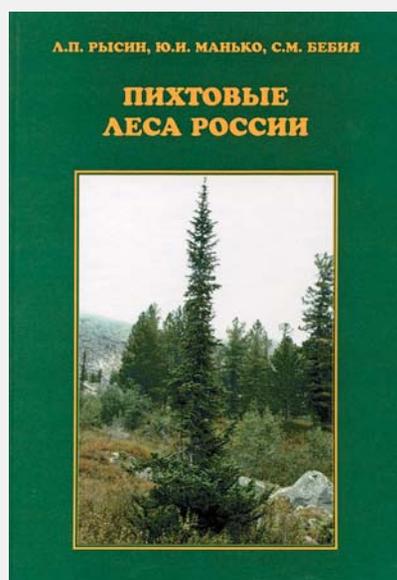
В основу книги, написанной в виде очерков, положены результаты работ, проведенных автором в Туве и на Алтае, где он искал потомков Чингиз-хана среди местного населения, используя методы молекулярной генетики. Исследования выявили, что приписываемая Чингиз-хану вариация Y-хромосомы представляет собой родовую хромосому современных кереев. Это одна из групп тех потомков племени кераитов, которые после разгрома их монголами были рассеяны среди тюркских народностей и племен. Вероятно, именно кераиты, участвуя в монгольских завоеваниях, широко распространили среди завоеванных этносов вариацию Y-хромосомы. Среди тувинцев, населяющих Тоджинскую котловину, выявлены мужчины, Y-хромосома которых имеет вариацию, сходную с той, что встречается у американских индейцев. Эти данные подтверждают представления, что народы, заселившие Америку через Берингию, начали движение из Алтай-Саянского региона.

В книге рассказано и о некоторых аборигенных домашних животных, которых встретил автор: о лошадях чубарой (леопардовой) масти (кони именно такой расцветки были у гонцов Чингиз-хана) и о собаках Монголии и Тувы (как известно из «Сокровенного сказания монголов», юный Темучин до смерти боялся пастушеских собак), особенно о тувинских овчарках, которых сейчас успешно разводят в Москве.



## Геоботаника. Охрана природы

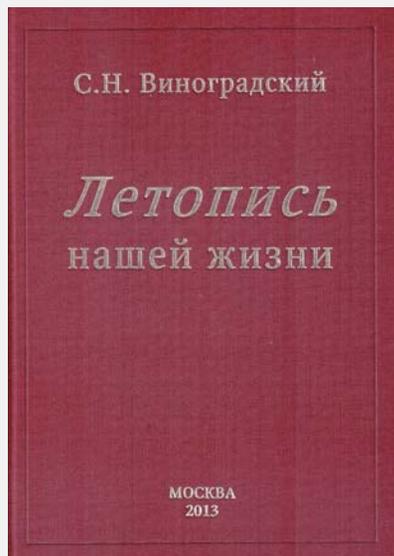
**А.П.Рысин, Ю.И.Манько, С.М.Бебия.** ПИХТОВЫЕ ЛЕСА РОССИИ. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 197 с.



Книга завершает серию монографий «Хвойные леса России», в которой ранее вышли сводки о еловых (2002), сосновых (2008), лиственничных (2010) и кедровых (2011) лесах. Обзорная статья В.А.Поварницына по лесам из сибирской пихты в СССР была опубликована в 1956 г., сводка А.Е.Маценко по систематике пихт Восточного полушария — в 1964 г. За прошедшее с тех пор время собраны и опубликованы многочисленные новые данные, которые рассеяны в разных изданиях. Обобщить их и провести их ревизию — такие задачи ставили перед собой авторы. Площадь пихтовых лесов России составляет 15 649 тыс га. Большая часть их (96.5%) находится в азиатской части страны. Наиболее широко распространена пихта сибирская, на Дальнем Востоке леса из пихты сибирской замещаются лесами из пихты других видов, а на Кавказе растут леса с господством пихты Нордманна. В книге на ценотическом уровне показано разнообразие пихтовых лесов. Кратко охарактеризованы основные типы лесов с господством пихты в восточной части Европейской России, на Урале, в Сибири, в Предбайкалье и Забайкалье, на Дальнем Востоке, в российской части Кавказа. Авторы использовали тот же так называемый «доминантный» подход в классификации растительности, что и в других книгах серии.

**Микробиология. История науки**

**С.Н.Виноградский. ЛЕТОПИСЬ НАШЕЙ ЖИЗНИ** / Отв. ред.: В.Ю.Афиани, В.Ф.Гальченко.  
Коммент. и сост.: Н.Н.Колотилова, Г.А.Савина. М.: МАКС Пресс, 2013. 808 с.



Данную хронику написал в 1941—1942 гг. выдающийся микробиолог С.Н.Виноградский (1856—1953), находясь в эмиграции во Франции и работая в специально созданном для него филиале Пастеровского института на маленькой ферме в Бри-Конт-Робере. Повествование охватывает все этапы жизни Виноградского, обогащая привычный образ ученого ранее неизвестными деталями о его учебе, о работе в Императорском институте экспериментальной медицины в Петербурге и за границей, о личной жизни, об успехах на музыкальном поприще, о годах эмиграции. В раздел «Приложение» включены работы, практически неизвестные российскому читателю. В первой части («Публицистика») собраны очерки и статьи Виноградского на политические темы, большинство из которых изданы в нашей стране впервые. Во вторую часть («Доклады и выступления») вошли его научные выступления, сделанные во Франции и до сих пор на русский язык не переводившиеся. Хорошо иллюстрированное и снабженное обстоятельными комментариями издание осуществлено Архивом РАН и Институтом микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН.

Выход в свет книги приурочен к 80-летию со дня рождения академика Г.А.Заварзина (1933—2011), чрезвычайно много сделавшего для увековечения имени Виноградского и для пропаганды его трудов. Именно рукописные материалы «Летописи» легли в основу книги Заварзина «Три жизни великого микробиолога. Документальная повесть о Сергее Николаевиче Виноградском» (М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 240 с.; второе изд., испр. и доп. — 2010. 232 с.).

# ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь

**Е.А.КУДРЯШОВА**

Научные редакторы

**О.О.АСТАХОВА**

**М.Б.БУРЗИН**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

**О.И.ШУТОВА**

Выпускающий редактор

**Л.П.БЕЛЯНОВА**

Литературный редактор

**Е.Е.ЖУКОВА**

Художественный редактор

**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией

**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Перевод:

**С.В.ЧУДОВ**

Корректоры:

**М.В.КУТКИНА**

**Л.М.ФЕДОРОВА**

Графика, верстка:

**А.В.АЛЕКСАНДРОВА**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

Учредитель:  
Российская академия наук,  
президиум  
Адрес издателя: 117997,  
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,  
Москва, Мароновский пер., 26  
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77  
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 17.12.2013  
Формат 60×88 1/8  
Офсетная печать  
Заказ 1950  
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»  
Академиздатцентра «Наука» РАН,  
121099, Москва, Шубинский пер., 6