

# ПРИРОДА

12 14



**В НОМЕРЕ:****3 Крапошин В.С., Талис А.Л.****Комбинаторика и прочность стали**

Обобщенная кристаллография, в отличие от традиционной, способна на геометрическом уровне представить, как происходят полиморфные превращения в кристаллах.

**13 Потемкина Т.Г.****Устья рек Байкала**

На экологическое состояние Байкала большое влияние оказывают впадающие в него реки. Их устья в первую очередь откликаются на природные и антропогенные изменения окружающей среды. В каких же условиях развиваются устьевые области байкальских рек, и как они влияют на режим озера?

**22 Струнов А.А., Жукова М.В., Малькеева Д.А., Киселева Е.В.****Бактерия *Wolbachia* – «серый кардинал» мира насекомых**

В природе существует много примеров тонкого взаимодействия партнеров симбиотической ассоциации, и самый яркий из них — «сотрудничество» бактерий рода *Wolbachia* с беспозвоночными. Манипулирование репродуктивной системой хозяев, влияние на их жизнеспособность и поведение на клеточном уровне делают *Wolbachia* одними из самых распространенных и «искусных» бактерий на планете.

**30 Гербек Ю.Э., Хантемирова С.Р.****Метилирование ДНК и поведение**

Что определяют поведение человека и животных? Связано ли оно с генотипом или с условиями среды? Ответить на эти вопросы позволяют эксперименты на животных, а также наблюдения за поведением разных групп людей.

**37 Панов Е.Н.****Как общаются амфибии**

Люди склонны «очеловечивать» животных. Этим грешат даже некоторые ученые, изучающие коммуникативное поведение животных и придающие особую роль их акустическим сигналам. Однако звуки, издаваемые, например, лягушками, — далеко не единственный способ их общения.

**48 Березкин Ю.Е., Боринская С.А.****О чем говорили наши далекие предки?**

Древние повествования, передаваемые из поколения в поколение и записанные у разных народов мира, позволяют не только проследить за их миграцией, но и узнать, о чем думали наши далекие предки.

**55 Холодов В.Н.****Научное творчество и возраст исследователя**

Роль возраста исследователя с давних времен оценивалась исходя из общих представлений о жизни среднестатистического человека. Между тем анализ творчества 126 ученых показал, что только 5–27% открытий сделано до 30 лет.

**Научные сообщения****66 Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т.****Метаногенный карбонат со дна Карского моря****Вести из экспедиций****69 Прудникова Т.Н.****Город древних земледельцев в Северо-Западной Монголии****Заметки и наблюдения****76 Рижинашвили А.Л.****На берегах разноцветного озера****Рецензии****81 Карпов Г.А.****Бактериальный газовый фильтр (на кн.: Г.А.Заварзин. Бактерии и состав атмосферы)****89****Новые книги****90****Тематический и авторский указатели за 2014 год**

## CONTENTS:

### **3 Kraposhin V.S., Talis A.L.** **Combinatorics and Strength of Steel**

Unlike traditional crystallography, the generalized crystallography is capable to represent the mechanism of polymorphic transformations in crystals at the geometrical level.

### **13 Potemkina T.G.** **Baikal Rivers Estuaries**

Ecological condition of Baikal is greatly influenced by its tributaries. Their estuaries are the first to react at natural and anthropogenic changes of the environment. What are the conditions in which estuaries of Baikal rivers evolve and how they influence the regime of the lake?

### **22 Strunov A.A., Zhukova M.V., Malkeeva D.A., Kiseleva E.V.** **Wolbachia – the «Power Broker» in Insect Life**

Nature abounds with examples of delicate interplay of partners in symbiotic associations, and the most striking of them is the «cooperation» of bacteria Wolbachia with invertebrates. Manipulation with reproductive system of the hosts, influence on their vitality and behavior make Wolbachia one of the most common and «artful» genus of bacteria on the Earth.

### **30 Gerbek Yu.E., Khantemirova S.R.** **DNA Methylation and Behavior**

What determines the behavior of humans and animals? Is it associated with genotype or environment conditions? Experiments on animals and observations of behavior of different groups of humans allows to answer these questions.

### **37 Panov E.N.** **How Do Amphibians Communicate**

People tend to «humanize» animals. Even some scientists studying communicative behavior of animals and ascribing a special role to their acoustic signals are not immune to this fallacy. But the sounds emitted by frogs, for example, are far from being the only way of their communications.

### **48 Berezkin Yu.E., Borinskaya S.A.** **What our Distant Ancestors Were Talking about?**

Ancient stories that have been passed from one generation to the next one and were written down from different peoples of the world allow not only track migrations but also to acknowledge what our distant ancestors were thinking about.

### **55 Kholodov V.N.** **Scientific Creativity and Age of Researcher**

The role of age of researcher since long ago have been estimated on the basis of general ideas about typical human life. But analysis of the works of 126 scientists has shown that only 5–27% of discoveries were done before 30 year age.

## Scientific Communications

### **66 Baturin G.N., Dubinchuk V.T.** **Methanogenic Carbonate from Kara Sea Bottom**

## Notes from Expeditions

### **69 Prudnikova T.N.** **Town of Ancient Farmers in North-Western Mongolia**

## Notes and Observations

### **76 Rizhinashvili A.L.** **On the Shores of Multicolored Lake**

## Book Reviews

### **81 Karpov G.A.** **Bacterial Gas Filter** (on book: G.A.Zavarzin. Bacteria and Atmosphere Composition)

## 89 New Books

### **90 Subject and Author Index for 2014**

# Комбинаторика и прочность стали



В.С.Крапошин, А.Л.Талис

В предыдущем номере журнала\* мы продемонстрировали, что если вооружить обобщенную кристаллографию методами алгебраической геометрии, можно на основе базовой строительной единицы — тетраэдрического семивершинника — получать «на кончике» пера структуры кристаллов, жидкостей и биополимеров, воспроизводя не только кристаллографические, но и некристаллографические элементы симметрии. Удастся ли использовать тот же язык при описании структурных преобразований в кристаллах?

## Как закаляется сталь?

Превращения в твердых телах — загадочное и одновременно чудесное явление. Загадка состоит в том, что мы не видим перемещений атомов, но графит превращается в алмаз (хотя и очень медленно), а кусок белого металлического олова — в серый полупроводниковый порошок (этот процесс носит выразительное название — «оловянная чума»). Олово становится порошком из-за огромной разницы плотностей упаковки атомов (удельного объема) в исходном тетрагональном кристалле бе-



**Валентин Сидорович Крапошин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им.Н.Э.Баумана. Основные научные интересы — фазовые и структурные превращения в сталях, сплавах и магнитных материалах и их влияние на физические и механические свойства.



**Александр Леонидович Талис**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института элементоорганических соединений им.А.Н.Несмеянова РАН. Занимается обобщенной кристаллографией, определением симметричных закономерностей строения биополимеров, а также структурных превращений в металлических и полупроводниковых кристаллах.

лого олова и в образовавшемся из него кубическом кристалле серого олова. Чудо же заключается в том, что это перерождение кристаллов может происходить без разрушения макроскопического тела, внутри которого один кристаллический структурный тип заменяется другим, как это наблюдается при закалке (упрочнении) стали. За 5 тыс. лет закалывания стали мы привыкли считать это само собой разумеющимся. А ведь при закалке новый кристалл низкой температурной модификации железа (с объемноцентрированной кубической решеткой) растет внутри исходного кристалла высокой температурной модификации (с гранецентрированной кубической решеткой) со скоростью звука в металле, т.е. около 1 км/с (многokратно измерено с помощью скоростной киносъемки). И это еще не все: на рис.1 показана микрофотография, на которой зафиксирована пространственная картина роста множественных кристаллов с такой «звуковой» скоростью при температуре жидкого азота!

\* См.: Крапошин В.С., Талис А.Л. Кристаллография и вещество // Природа. 2014. №11. С.3—15.

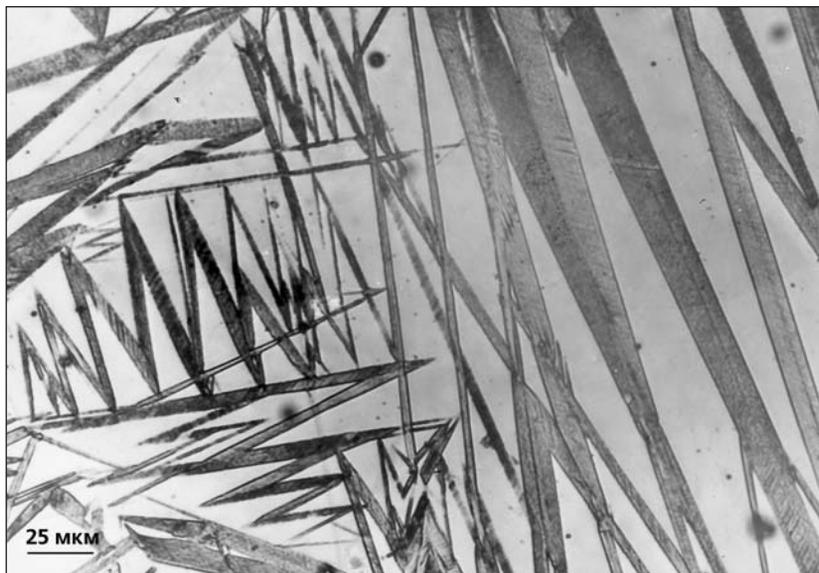


Рис.1. Микроструктура сплава железа с 0.43% углерода и 29% никеля после погружения в кипящий жидкий азот с температурой  $-196^{\circ}\text{C}$  (снимок в оптическом микроскопе). Благодаря большому содержанию углерода и никеля начало полиморфного превращения в этом сплаве смещается до очень низкой температуры  $-170^{\circ}\text{C}$  («мартенситной точки»). В обычных сталях без никеля эта точка составляет  $300-100^{\circ}\text{C}$  (понижается с увеличением содержания углерода). Чтобы увидеть структуры в оптическом микроскопе, поверхность образца отполировали до зеркального состояния, а затем на нее капнули сильную кислоту. Из-за разных межатомных связей в образовавшемся кристалле мартенсита с объемноцентрированной кубической решеткой и в исходном кристалле с гранецентрированной кубической решеткой эти два кристалла окисляются («ржавеют») с разной скоростью, и в микроскопе видны более темные молниеобразные новые кристаллы мартенсита на светлом поле исходного кристалла, более благородного (химический термин, означает более высокое сопротивление окислению, как у благородных золота, серебра и платины).

Характерное зигзагообразное (напоминающее молнии) расположение пластинок нового кристалла наглядно свидетельствует, что он формируется вдоль строго определенных кристаллографических плоскостей и направлений. Скорость роста так высока, что новый кристалл не обращает внимания на температуру: это превращение, названное по имени первооткрывателя Адольфа Мартенса (Германия, 1850—1914) мартенситным, зарегистрировано даже при температуре кипения жидкого гелия (примерно  $-269^{\circ}\text{C}$ ). Собственно, это чудесное преобразование в сталях, т.е. сплавах железа с углеродом (мартенситное превращение) и стало основой современной технической цивилизации, построенной на машиностроении. Действительно, мы знаем, что камень прочен, а листок дерева — нет, и думаем, что понимаем, почему это так. А сталь мы нагреваем до температуры красного каления ( $800-1200^{\circ}\text{C}$ ), затем переносим в холодную воду, и ее прочность увеличивается во много раз. Но химический состав мы не меняли, вообще ничего не делали, только дали остыть. В каком-то смысле метаморфозы кристалли-

ческих структур можно уподобить не менее чудесному развитию «мертвой» куколки в бабочку: ничего не движется, снаружи ничего не меняется, и вдруг появляется живой, да еще и летающий, объект. Объяснять практическую важность физических представлений о внутрикристаллических процессах не нужно: помимо упомянутой закалки сталей это еще и эффект восстановления формы, и «обратный» ему эффект сверхупругости. Последние сводятся к тому, что если металлический сплав, способный к развитию мартенситного превращения, деформировать в одном кристаллическом состоянии, а затем с помощью изменения температуры перевести в другое, то протекающее при этом мартенситное превращение кристаллов восстановит внешнюю форму макроскопического тела. Например, проволоку, изготовленную из этого сплава, можно завить в спираль, нагреть, и она распрямится, выполнив при этом механическую работу. На этих явлениях основаны многие новейшие приборы и устройства, включая преобразователи энергии, а сами они обусловлены исключительно мартенситными, или полиморфными (более общий тер-

мин, относящийся не только к металлам), превращениями одной кристаллической структуры в другую. Хорошо ли мы понимаем, что при этом происходит в действительности?

В области теоретического описания мартенситных превращений в сталях была выполнена огромная работа, но полной физической картины самого превращения нет до сих пор. Одно можно утверждать с определенностью: кристаллы, образующиеся в результате протекающего в твердом состоянии полиморфного превращения, всегда наноструктурированы (рис.2). Мало того что они всегда растут в виде тонких пластинок — это понять легко (острая бритва режет лучше, чем тупая), а вот зачем растущий со скоростью звука кристалл разбивается на пластиночки толщиной в несколько десятков нанометров? С точки зрения потребителя, это делается для упрочнения стали, но как? На наш взгляд, все развиваемые подходы не учитывают в полной мере симметрии модифицирующегося кристалла, хотя некоторые и называются кристаллографическими. Основная концепция большинства теорий — концепция инвариантной, т.е.

не претерпевающей изменений при перестройке, плоскости. Действительно, в обоих партнерах по превращению имеются «похожие» плотноупакованные плоскости. Искусственное условие инвариантности этой плоскости постулируют на фоне того факта, что элементарная ячейка деформируется (от исходной фазы к конечной). Но при такой деформации мы попадаем в модель сплошной среды, теряя «кристаллографический» и, конечно, трехмерный характер рассмотрения. Межатомные расстояния в элементарной ячейке разные, да и что делается в плоскостях, соседних с «инвариантной», остается неизвестным. Кроме того, элементарная ячейка в той или иной решетке выбирается многими способами, и откуда известно, что в существующих теориях выбор элементарной ячейки, подвергающейся деформации, сделан наилучшим образом? Атомы «знают» только ближайших соседей, элементарной ячейки они «не знают». Неслучайно, что ни один из вариантов теории превращения с инвариантной плоскостью не может объяснить все так называемые кристаллогеометрические свидетельства превращения: ориентационные соотношения между партнерами по превращению и габитусные плоскости (плоскости огранки) продукта превращения.

Вообще габитус (огранка) растущих кристаллов низкотемпературной модификации железа — самый трудный вопрос для физических теорий мартенситного превращения. В сталях (а это основной объект теорий) оба партнера по превращению имеют высокосимметричную кубическую решетку, и, казалось бы, габитус растущего кристалла должен быть связан с этой высокой симметрией. Говоря по-простому, мы знаем, что кристаллы поваренной соли (с кубической гранецентрированной решеткой) предпочитают расти с кубической огранкой, т.е. их габитус совпадает с гранью куба (на языке кристаллографии — плоскости  $(100)^*$ ). Ал-

\* Три числа в скобках, т.е. 1, 0 и 0, — это индексы Миллера, с помощью которых принято описывать ориентировку плоскости в кристалле. Плоскость отсекает отрезки на осях координат. Отношение обратных длин этих отрезков и характеризует положение плоскости в пространстве. Ноль соответствует бесконечному отсекаемому отрезку для плоскости, параллельной данной оси. Поэтому  $(100)$  — грань куба,  $(111)$  — грань октаэдра.

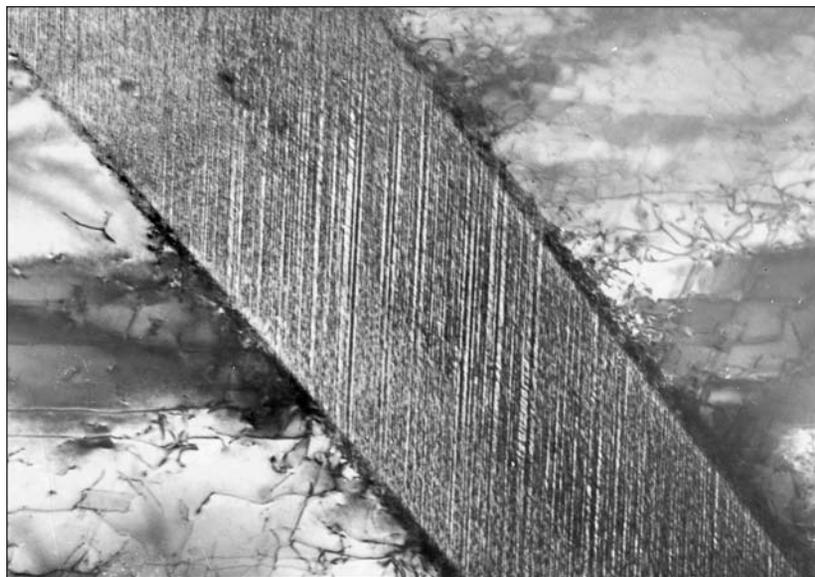


Рис.2. Изображение тонкой пластины нового кристалла мартенсита в просвечивающем электронном микроскопе. Сплав тот же, что на рис.1, охлаждение тоже в жидком азоте. Для получения изображения приготовили тонкий срез образца толщиной менее 1 мкм и растворением в кислоте уменьшили толщину до 0.1 мкм, чтобы электронный пучок, ускоренный напряжением 100 кВ, смог пройти сквозь образец. Дифракция пучка происходит на различно ориентированных кристаллах, и благодаря различию углов дифракции мы наблюдаем светлые и темные участки (дифракционный контраст). Поперечник мартенситной пластины равен примерно 1.3 мкм. Видно, что сама пластина разбита на параллельные пластины толщиной 15—20 нм, находящиеся между собой в двойниковой ориентировке. В окружающей матрице исходного кристалла можно заметить отдельные линии — дефекты кристаллического строения (дислокации). Дифракция от этого линейного участка кристалла происходит под другим углом, и он выглядит более темным.

маз с такой же решеткой (но другой структурой!) предпочитает расти с гранями октаэдра (плоскости  $(111)$ ). От железа следовало бы ожидать чего-нибудь похожего. А в многочисленных экспериментах получаются плоскости габитуса с индексами, выражаясь обывательски, «дурацкими»:  $(15.10.3)$ ,  $(522)$ ,  $(557)$  (это плоскости в системе координат исходного высокотемпературного кристалла, так удобнее интерпретировать экспериментальные данные). Данные грани закономерно повторяются в экспериментах, реализация того или иного типа плоскости из этого набора зависит от химического состава стали и температуры протекания превращения, но как это связано с кубическими решетками?

Какую такую особую роль играют эти плоскости в решетках с кубической симметрией? Что они кубу, и что им куб? Решалась эта проблема без всяких кристаллографических представлений, как раз методами механики сплошных сред (в общем-то, приемами сопромата), т.е. искалось такое поле напряжений, при котором растущий кристалл раздвигает (разрезает) материнский кристалл именно в том направлении, которое наблю-

дается в эксперименте как габитусная плоскость. Иначе говоря, поле напряжений подгоняли к наблюдаемой габитусной плоскости. Почти во всех случаях это удалось, т.е. та или иная габитусная плоскость следовала из поля напряжений. Да вот беда, одна из этих плоскостей, а конкретно {522}, из полей напряжений никогда не вытекала, так и оставаясь необъяснимой. Объяснение же физического явления «почти во всех случаях» удовлетворительным, конечно, считаться не может. Для полноты картины надо сказать, что поле напряжений для этой плоскости подобрать все же удалось, но оно оказалось «нефизическим» — всесторонним растяжением, и сами авторы этих теорий признали, что такое объяснение физического смысла не имеет.

### Новые возможности комбинаторики

Понятно, что раз в эксперименте фиксируются повторяющиеся кристаллографические «реперные точки», значит у превращения должен быть симметричный базис более широкий, чем одна инвариантная плоскость. Нам кажется, что лучше не деформировать элементарную ячейку, а переставлять атомы, но переставлять кооперативно, сразу некую их группу, не разрушая весь кристалл (что и наблюдается в эксперименте). Надо попробовать привлечь теорию перестановок, тем более, как упоминалось в нашей предыдущей статье, кристаллографические группы представляют собой частный случай групп перестановок. При построении структур мы там использовали минимальное поле Галуа порядка 2 и убедились, что оно приводит к единственному семивершинному тетраэдрическому кластеру, а варианты структур начинаются с объединения двух таких кластеров по общей грани в один 11-вершинный кластер. Галуа выделил особые группы, определяемые полями с  $p = 3, 5, 7, 11$ , поэтому стоит познакомиться с симметричной конструкцией, соответствующей максимальной из этих групп.

В современной комбинаторике есть раздел блокового дизайна, рассматривающий так называемые  $t$ - $(v, k, \lambda)$ -схемы, т.е. множества из  $v$  элементов, разбитые на подмножества (блоки) из  $k$  элементов так, что любые  $t$  элементов содержатся в  $\lambda$  блоках [1]. Нам удалось установить [2], что одна из таких схем, а именно схема 4-(11, 5, 1), своими симметричными перестановками адекватно описывает полиморфные превращения в металлах. В табл.1 показана эта схема, называемая еще системой Штайнера  $S(4, 5, 11)$ . Число 10 для удобства обозначено римской цифрой X. Число элементов схемы как раз равно порядку поля Галуа  $v = p = 11$  (собственно, вся система Штайнера порождается полем Галуа порядка 11). Напомним, что в поле Галуа два числа, отличающиеся на величину  $p$ , считаются равными по модулю  $p$ , например 1 и 12 по

модулю 11 равны. Жирным шрифтом выделена крайняя левая колонка, являющаяся подсистемой 2-(11, 5, 2) системы Штайнера. Числа 1, 3, 4, 5, 9, образующие стартовый блок этой подсистемы, — квадраты поля Галуа порядка 11:  $1^2 = 1, 2^2 = 4, 3^2 = 9, 4^2 = 16 - 11 = 5, 5^2 = 25 - 11 \cdot 2 = 3, 6^2 = 36 - 11 \cdot 3 = 3, 7^2 = 49 - 11 \cdot 4 = 5, 8^2 = 64 - 11 \cdot 5 = 9, 9^2 = 81 - 11 \cdot 7 = 4, 10^2 = 100 - 11 \cdot 9 = 1$ .

В системе Штайнера (4,5,11) всего  $11 \cdot 6 = 66$  блоков. Они отображаются друг в друга  $11 \cdot 6! = 7920$  перестановками (11 строк и все перестановки шести столбцов), образующими группу симметрии этой системы. Среди этих перестановок есть генерирующие, произведения и степени которых позволяют получить все остальные.

Все 66 блоков системы порождаются стартовым блоком  $V_1 = (13459)$ . При этом вся система разбивается на две подсистемы, блоки которых конструируются из стартового по разным правилам. К первой подсистеме относится только первый столбец, содержащий сам стартовый блок. Одно из важнейших свойств системы Штайнера 4-(11, 5, 1) — каждая четверка чисел содержится только в одном пятиэлементном блоке, почему ее и обозначают как  $S(4, 5, 11)$ . Выделенный нами первый столбец обладает дополнительным свойством: любые два числа содержатся только в двух блоках. Соответственно, эта подсистема имеет обозначение 2-(11, 5, 2).

Все 11 блоков подсистемы 2-(11, 5, 2) получаются из стартового  $V_1$  с помощью такой процедуры: к каждому из его элементов 1, 3, 4, 5, 9 прибавляется любой другой из них же (у нас прибавлена единица), и эта операция повторяется над каждым новым блоком. Остальные блоки табл.1 в столбцах тоже расположены в порядке, соответствующем прибавлению единицы. Они также порождаются стартовым блоком 13459, но по более сложному правилу. Сначала из каждого числа в этом блоке надо вычесть одно из входящих в него чисел, затем на полученную пятерку чисел действовать одной из генерирующих перестановок  $\sigma = (1X)(25)(37)(48)(69)$ , которая на 0 не действует, 1 переводит в X, X — в 1, 2 — в 5, 5 — в 2, 3 — в 7, 7 — в 3 и т.д., т.е. подстановка  $\sigma$  переводит

**Таблица 1**  
**Система Штайнера  $S(4, 5, 11)$  —**  
**схема 4-(11, 5, 1)**

<b>13459</b>	07293	03618	0412X	06X59	05784
<b>2456X</b>	183X4	14729	15230	1706X	16895
<b>35670</b>	29405	2583X	26341	28170	279X6
<b>46781</b>	3X516	36940	37452	39281	38X07
<b>57892</b>	40627	47X51	48563	4X392	49018
<b>689X3</b>	51738	58062	59674	504X3	5X129
<b>79X04</b>	62849	69173	6X785	61503	6023X
<b>8X015</b>	7395X	7X284	70896	72615	71340
<b>90126</b>	84X60	80395	819X7	83726	82451
<b>X1237</b>	95071	914X6	92X08	94837	93562
<b>02348</b>	X6182	X2507	X3019	X5948	X4673

одну пятерку чисел в другую. Далее к каждому из полученных пяти чисел добавляется одно из чисел от 0 до 10. Например, если из чисел блока В, вычесть 1, то получим пятерку 02348, которую  $\sigma$  отобразит в 05784. Добавив 2 ко всем числам полученной пятерки, получим блок 279Х6, находящийся в третьей строке шестого столбца таблицы. Ниже мы покажем, что система Штайнера и ее группа симметрии предсказывают существование 11-вершинного кластера и взаимные превращения в металлах.

Как сказано выше, каждая четверка чисел содержится только в одном пятиэлементном блоке. Но четырем числам можно сопоставить четыре вершины тетраэдра, и это сопоставление будет однозначным именно потому, что тогда каждому тетраэдру реальной структуры будет соответствовать только один блок системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ . С другой стороны, в каждом блоке из пяти элементов четыре вершины можно выбрать четырьмя способами. Это означает, что одни и те же вершины могут принадлежать разным тетраэдрам, т.е. подстановки данной системы должны позволить выполнять превращения.

## Блоки как кластеры

Мы показали [2], что подсистема 2-(11, 5, 2), т.е. первый столбец системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ , позволяет выделить в ней 9 блоков, которые отображаются друг в друга другой генерирующей подстановкой, обозначаемой  $\alpha = (1)(3)(459)(27X)(068)$ . Последовательность элементов в каждой круглой скобке соответствует их подстановкам, например (1) означает, что 1 отображается в себя, а (459) означает, что 4 отображается в 5, 5 — в 9, а 9 — в 4. Если элементы блоков рассматривать как номера вершин соответствующей структуры, подстановка  $\alpha$  описывает действие поворотной оси третьего порядка. Очевидно, что вершины 1 и 3 расположены на поворотной тройной оси, а вершины 4, 5 и 9 служат вершинами равностороннего треугольника, через центр которого и перпендикулярно его плоскости проходит данная ось. Для нумерации вершин можно использовать аналогично и остальные шесть элементов. Выделенные блоки совместно со стартовым блоком (13459) обеспечивают однозначное определение 11-вершинного кластера. Данный кластер представляет собой объединение восьми равносторонних тетраэдров (рис.3).

Строение полученного кластера позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, это часть трехмерной проекции четырехмерного аналога икосаэдра, выполненная от грани 459 [3, табл.7]. Во-вторых, он имеет столько же вершин, сколько у объединения двух семивершинников, т.е. принятых нами основных строительных единиц. В-третьих, такой кластер действительно встречается в структуре многих интерметаллидов. Например,

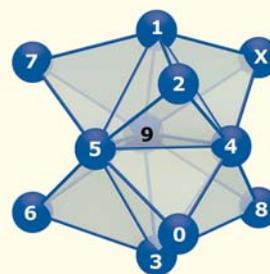


Рис.3. Тетраэдрический кластер с 11 вершинами, инвариантный относительно операций симметрии системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ . Кластер совпадает с фрагментом трехмерной проекции четырехмерного аналога икосаэдра на грань 4-5-9 и содержится в виде изолированного кластера  $In_{11}$  в соединении  $K_8In_{11}$ .

именно эту фигуру образует изолированный кластер атомов индия в структуре интерметаллида  $K_8In_{11}$  [4]. Кластер можно рассматривать также как общую часть трех взаимно пересекающихся икосаэдров в структурах интерметаллидов  $Al_{10}Mn_3$ ,  $Al_5Co_2$ ,  $Al_3V_4$ ,  $\gamma$ -латуни и многих других [5]. Рис.4 иллюст-

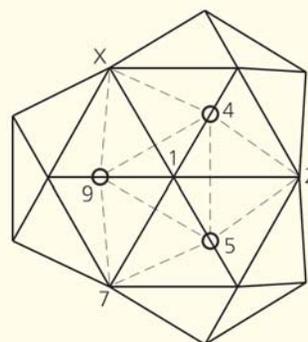


Рис.4. Пересечение трех икосаэдров в гексагональной структуре соединения  $Al_{10}Mn_3$  (а также  $Al_5Co_2$ ,  $Al_3V_4$  и многих других). Выделенный пунктиром кластер служит частью общего участка при пересечении трех икосаэдров. Нумерация его вершин сделана согласно таковой на рис.3. Под вершиной 1 находится проекция вершины 3, под вершинами 2, 7, X соответственно — проекции вершин 0, 6 и 8. Вершины 4, 5 и 9 заняты атомами марганца, остальные — атомами алюминия. Благодаря разнице атомных диаметров этих металлов угол между осями пятого порядка икосаэдра, равный в правильном икосаэдре  $63.43^\circ$ , уменьшается до  $60^\circ$ , и искаженные икосаэдры в трехмерной евклидовой проекции пересекаются по равностороннему треугольнику. Поэтому кристаллические структуры никогда не содержат правильных икосаэдров. Подчеркнем, что экспериментально определенные координаты атомов в этом кластере совпадают с координатами фрагмента проекции четырехмерного аналога икосаэдра в трехмерное евклидово пространство.

рирует это для случая кристалла  $Al_{10}Mn_3$ ; подчеркнем, что показанное там взаимное пересечение трех икосаэдров — экспериментальные данные, т.е. результат определения атомных позиций в этом соединении. В  $\gamma$ -латуни (и других кристаллах) икосаэдры тоже пересекаются (рис.5). В структурах этих соединений 11-атомный кластер образует бесконечную непрерывную сетку, треугольник 459 заселен атомами переходного металла (Mn, Co, или V), а остальные вершины заняты атомами алюминия. Деформация ребер, необходимая для выпрямления фрагмента четырехмерного аналога икосаэдра (его вершины лежат на трехмерной сфере) в трехмерное евклидово пространство, выполняется «химическим» способом — заселением вершин атомами другой химической природы (и соответственно, другого диаметра). Совпадение конструкции, выведенной из системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ , т.е. из абстрактной комбинаторной схемы, с экспериментально наблюдаемыми кластерами стимулирует априорный вывод возможных перестановок атомов как симметричных перестановок этой конструкции.

В выбранной нами системе Штайнера  $S(4, 5, 11)$  каждая тройка чисел принадлежит только еще трем блокам. При отображении блока в блок симметричные подстановки сохраняют не менее трех чисел. Сама тройка сохраняемых чисел составляется из представителей троек, входящих в подстановку  $\alpha$ . Выбор элемента группы симметрии системы Штайнера определяется принадлежностью сохраняемой тройки чисел только еще трем блокам. Например, для тройки чисел 570 (5 принадлежит (459), 7 — (27X) и 0 — (068)) из блока 15907 = 19570 такими блоками будут 36570, 57084 и 2X570. Трансформации исходного кластера (см. рис.3) гипотетически возможны путем замены ребра 19 на ребра 36, 48 и 2X. Ребра 36 и 48 в нем уже существуют, поэтому переходы от исходного блока 19570 к блокам 36570 и 48570 соответствуют просто удалению ребра 19, но для кооперативного превращения это не подходит (число атомов должно сохраняться). Ребра 2X в исходном кластере нет. Поэтому переход от блока 19570 к блоку 2X570 может определить такую трансформацию кластера, при которой число его вершин, ребер и граней сохраняется. Применение подстановки  $\alpha$  к исходному блоку 19570 и полученному блоку 2X570 позволяет получить две тройки блоков (строки в табл.2), инвариантных относительно  $\alpha$  и отображаемых друг в друга некоторой другой перестановкой системы Штайнера. Верхняя тройка блоков соответствует трем «верхним» тетраэдрам 11-атомного кластера. Аналогично для трех «нижних» тетраэдров получаем три другие пары блоков (табл.3). Переход от блоков в верхнем ряду к блокам в нижнем ряду (табл. 2 и 3) производится заменой несовпадающих чисел, которой соответствует отбрасывание ребра 19 и введение ребра 2X, отбрасывание ребра 14 и введение ребра 72 и т.д.

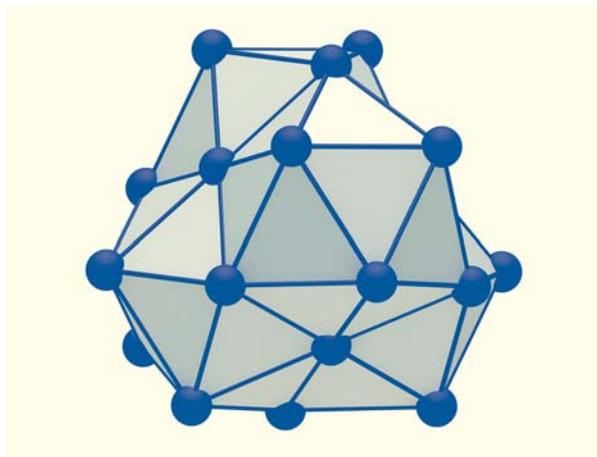


Рис.5. Фрагмент проекции четырехмерного аналога икосаэдра — пересечение четырех икосаэдров по правильному тетраэдру — реализуется в кубических структурах  $\gamma$ -латуни  $Cu_3Zn_8$ , соединений  $Al_{13}Cr_4Si_4$ ,  $Th_6Mn_{23}$ ,  $Ti_2Ni$ , карбида  $(Fe, W)_6C$  — быстрорежущей стали. Правильность тетраэдра обеспечивается заселением его вершин атомами одного компонента, остальные вершины икосаэдров заселены атомами другого компонента с другим размером атомов. Как и в тригональном кластере на рис.4, экспериментальные позиции атомов совпадают с вершинами проекции фрагмента четырехмерного аналога икосаэдра.

Таблица 2

Три пары блоков системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ , соответствующих трансформациям «верхних» тетраэдров кластера с рисунка 3

19570	149X6	15428
2X570	729X6	X7428

Таблица 3

Три пары блоков системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$ , соответствующих трансформациям «нижних» тетраэдров кластера с рисунка 3

39562	34987	3540X
08562	60987	8640X

Рассмотренные выше переброски ребер трансформируют исходный тетраэдрический кластер в два одношапочных октаэдра (рис.6). В целом трансформации 11-вершинного тетраэдрического кластера в два одношапочных октаэдра соответствует замена блоков, показанная в табл.4. Здесь промежуточные математические выкладки опущены. Отметим, что преобразованию стартового блока 13459 в блоки 1327X и 13068 отвечает появление тетраэдрических шапочек 127X и 3068 у октаэдров. Полученная конфигурация эквивалентна дефекту упаковки (границе двойника {111}) в гранцентрированной кубической упа-

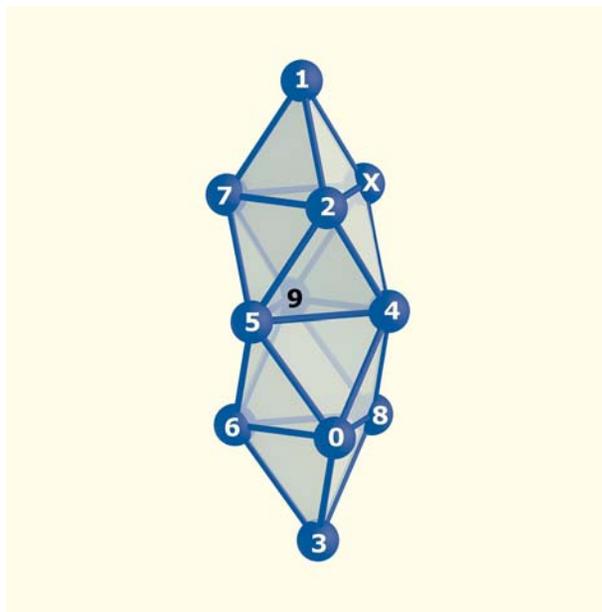


Рис.6. Замена ребер 1-5, 1-4 и 1-9 на ребра 2-7, 7-X и 2-X и 3-5, 3-4, 3-9 на 0-6, 0-8 и 6-8 ребер трансформирует кластер с рис.3 в два одношапочных октаэдра. Эта конфигурация соответствует дефекту упаковки в гранецентрированной кубической решетке по плоскости {111}, или, что то же самое, когерентной границе двойника.

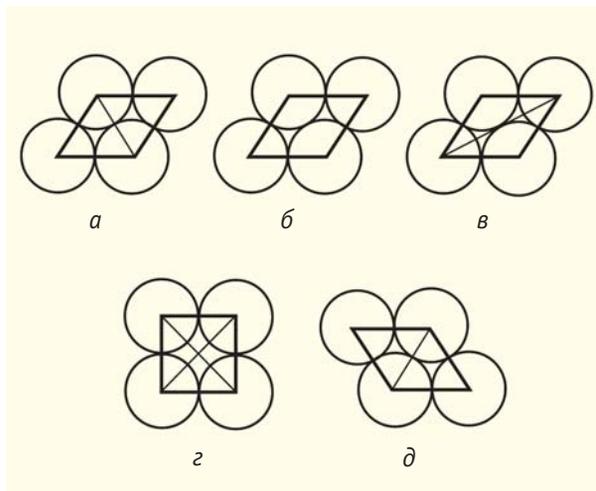


Рис.7. Элементарный акт полиморфного превращения: операция, однозначно соответствующая симметрии четырехмерного аналога икосаэдра (дисклинация), заменяет короткую диагональ на длинную (от  $a$  к  $d$ ) в ромбе, состоящем из двух равносторонних треугольников. Ориентация ромба на плоскости меняется. Видно, что действие дисклинации меняет число ребер, сходящихся в вершине. Когда диагонали уравниваются, возникает промежуточная квадратная конфигурация (г), соответствующая энергетическому барьеру превращения.

**Таблица 4**

**Замена блоков системы Штайнера, трансформирующая тетраэдрический кластер (рис.3) в два одношапочных октаэдра (рис.6)**

13459	1327X
19570	2X570
149X6	729X6
15428	X7428
13459	13068
39562	08562
34987	60987
3540X	8640X
45920	45920
59476	59476

ковке. Последние три блока, соответствующие трем треугольникам с общим ребром, неизменны, меняется только угол между плоскостями треугольников, не совпадающих с общей гранью 459.

### Превращения как перестановки

Взаимные отображения блоков, определяемых выбранной нами системой Штайнера  $S(4, 5, 11)$ , моделируют физический процесс переброски диагоналей ромба (переключения химических связей), показанный на рис.7. Ромб на этом рисунке соот-

ветствует слегка изломанным (не плоским) ромбам кластера на рис.4: 1-2-5-7, 1-7-9-X и т.д. Например, исходная короткая диагональ 1-5 ромба 1-2-5-7 после переброски становится длинной диагональю того же ромба, а короткой становится «бывшая длинная» диагональ 7-2. Так мы перешли от трех тетраэдров 1-5-4-2, 1-5-4-9 и 1-5-9-7 с общим ребром 1-5 к октаэдру 2-7-X-4-5-9. «Новые короткие» диагонали 7-2, 2-X и X-7 стали теперь ребрами верхней «крышки» вновь возникшего октаэдра. Переход от тетраэдрического кластера на рис.3 к двум одношапочным октаэдрам описывает переброски диагоналей 19, 14 и 15 соответствуетственно в ромбах 179X, 1X42 и 1257. На языке политопной концепции переброски диагонали отвечает некий элемент группы симметрии политопа. Повторное действие этого элемента дает тождественное преобразование, т.е. ромб возвращается в исходное состояние. Впервые такая переброска была предложена для объяснения перехода между двумя изомерами молекулы карборана  $C_2B_{10}H_{12}$  [6], в нем переключаются\* связи между атомами бора и углерода на поверхности икосаэдрической молекулы. В исходном изомере два атома углерода, образующие короткую диагональ ромба из двух треугольных граней икосаэдрической молекулы, после переброски диагоналей (рис.7) заселяют вершины

\* Переключаться в принципе могут любые связи, этому способствуют тепловые колебания решетки сами по себе и их анизотропия.

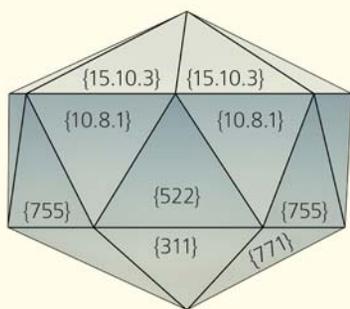


Рис.8. 14-вершинный полиэдр Франка—Каспера, строительная единица структур многих интерметаллидов. Порождается действием на икосаэдр дисклинации, увеличивающей с пяти до шести число вершин, ближайших к вершинам икосаэдра, которые лежат на общей оси симметрии пятого порядка. При этом число вершин всего полиэдра увеличивается с 12 до 14, а данная ось превращается в ось шестого порядка, что отвечает переходу от гранецентрированной к объемноцентрированной кубической структуре. В соответствии с наблюдаемыми на опыте ориентационными соотношениями при полиморфном превращении в железе эта ось должна быть параллельна оси третьего порядка исходного кубического кристалла. На гранях поставлены их индексы Миллера в этой экспериментальной ориентировке. Индексы {755}, {522}, {15.10.3} совпадают с габитусами мартенсита в разных сталях, зафиксированными разными авторами. В некоторых статьях приводят индексы габитуса {952}, что находится в пределах экспериментальной погрешности определения угла ориентировки в 4° относительно габитуса {15.10.3} из других работ.

длинной диагонали, т.е. разделены «новой короткой» диагональю — общим ребром треугольника. Это и есть другой изомер икосаэдрической молекулы  $C_{2}V_{10}N_{12}$ . Мы считаем: такая переброска диагоналей ромба — элементарный акт любого структурного превращения в металлических кристаллах, что хорошо согласуется [7, 8] с экспериментальными данными по кристаллогеометрии мартенситных превращений в сталях. В частности, наш подход преодолевает главную трудность общепринятых теорий превращений с инвариантной плоскостью — объяснение всех наблюдаемых габитусов получающегося мартенситного кристалла. Не вдаваясь в излишние детали, скажем главное: при смене в кристалле гранецентрированной кубической решетки на объемноцентрированную совокупность подобных перебросок диагоналей ромба на поверхности координационных полиэдров (первых координационных сфер) этих решеток включает переход от икосаэдра с 12 вершинами к 14-вершинному полиэдру (рис.8). Образование икосаэдра в гранецентрированной кубической решетке — промежуточная, но неизбежная стадия.

Почему от 12-вершинника к 14-вершиннику — понятно. Первая координационная сфера (ближайшие соседи) любого атома в гранецентриро-

ванной кубической решетке содержит 12 атомов, а в объемноцентрированной кубической решетке кристаллография всегда рассматривает сразу две сферы: первую (восемь вершин куба) и вторую (шесть центров соседних кубов), т.е. 14-вершинник. Показанный на рис.8 14-вершинник Франка—Каспера затем превращается в 14-вершинник конечного продукта превращения — объемноцентрированной кубической решетки. Но какие-то доли секунды (обычные скорости охлаждения при закалке сталей — около 100 град/с) в кристалле существует конфигурация 14-вершинника Франка—Каспера. На рис.8 мы видим, что индексы его разных граней в координатах исходной решетки, ориентированной в соответствии с наблюдаемыми ориентационными соотношениями, отвечают всем наблюдаемым в эксперименте граням габитуса конечного мартенситного кристалла. Краткого времени существования этой конфигурации оказывается достаточно для выполнения известного принципа Гаюи: внешняя огранка кристалла отражает его внутреннее строение.

Анализ симметричных преобразований блоков системы Штайнера  $S(4, 5, 11)$  позволил нам найти преобразования блоков, указывающие, какие диагонали надо перебросить, чтобы получить кластеры, генерирующие типичные для металлов структуры конденсированных фаз: полиэдры Бернала с восемью, девятью (рис.9) и 10 вершинами, кубическую гранецентрированную (рис.10,а), гексагональную плотноупакованную (рис.10,б), фазу высокого давления титана ( $\omega$ -фазу, рис.10,в), из которой вертикальным смещением атомных рядов получается объемноцентрированная кубическая структура (типа вольфрама). По поводу двух последних надо заметить, что обе эти структуры представляют собой объединение трех деформированных октаэдров вокруг общего ребра. В этом отношении они оказываются трехмерными сече-

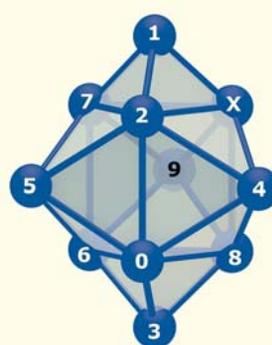


Рис.9. Замена ребер 4-5, 5-9 и 9-4 в кластере на рис.6 соответственно на ребра 2-0, 7-6 и X-8 порождает тригональную призму с пятью шапочками. Без двух соосных с призмой тетраэдрических шапочек это известный полиэдр Бернала (элемент строения жидкости), в вершинах 4, 5 и 9 которого сходятся по четыре ребра.

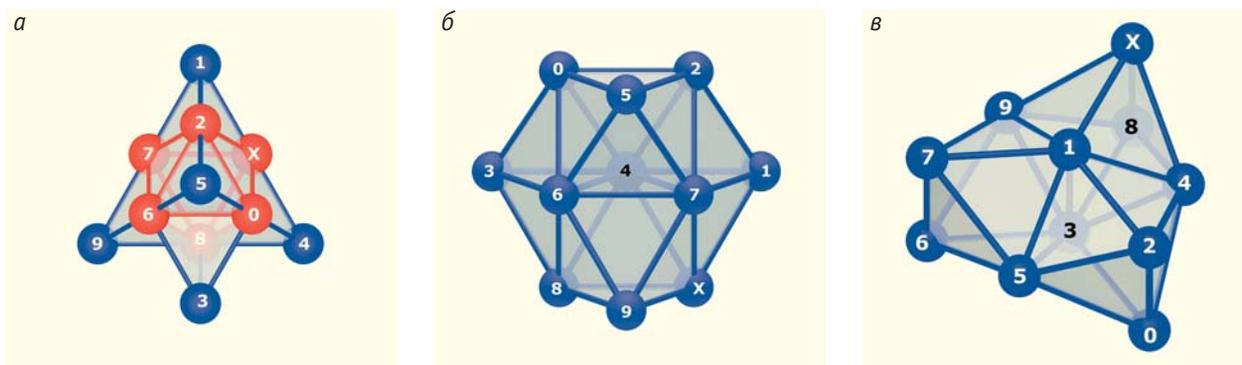


Рис.10. Фрагмент гранецентрированной кубической упаковки получается трансформацией кластера с рис.9 заменой ребер 7-5, X-9, 2-4 на ребра 2-6, 7-8, X-0 (а). Фрагмент гексагональной плотной упаковки получен из кластера с рис.9 заменой ребер 8-0 и 2-X на ребра 3-4 и 1-4 (б). Фрагмент гексагональной фазы высокого давления титана и циркония (в). При атмосферном давлении введение в титан других металлов, например молибдена, стабилизирует  $\omega$ -фазу, и она существенно усиливает хрупкость титановых сплавов. Такую же структуру имеют соединения  $AlB_2$ ,  $Ni_2In$  (двухатомная  $\omega$ -фаза).

ниями вдоль разных осей симметрии одного и того же четырехмерного политопа, генерируемого объединением трех правильных октаэдров вокруг каждого ребра. Плотнупакованная кубическая структура, как было показано выше, выводится путем проекции из четырехмерного политопа, собранного из тетраэдров.

Тригональная призма с полуоктаэдрическими шапочками играет важную роль в металлических структурах — это строительная единица карбида железа  $Fe_3C$  и многочисленных родственных структур (карбидов, боридов, фосфидов, силицидов металлов), а также металлических стекол. Одновременно это строительный элемент границы двойника (дефекта) в гранецентрированной кубической структуре по плоскости (113) и двойника по плоскости (112) в объемноцентрированной кубической и гексагональной плотнупакованной структурах. Собственно, переброска из тригональной призмы во фрагмент кубической плотной упаковки представляет собой механизм превращения кубической гранецентрированной модификации железа в ромбический карбид железа  $Fe_3C$  (в соответствии с диаграммой состояния железо—углерод) [8]. Заметим, что одна из граней 14-вершинника на рис.8 имеет индексы {113}. Из-за ограниченного объема статьи здесь не показано, как из 11-вершинного кластера получают и другие полиэдры Бернала (с восемью и десятью вершинами). 11-вершинный фрагмент тетраэдрической цепочки на рис.3 нашей первой статьи, т.е. элемент строения металлических жидкостей и металлических стекол, получается из двух одношапочных октаэдров на рис.6 заменой двух ребер: ребра 2-5 на ребро 7-4 и ребра 0-4 на ребро 5-8. Подчеркнем также, что любая из указанных выше перебросок ребер 19, 14 или 15 оказывается переброской общего ребра трех тетраэдров, объединенных по граням, и эта переброска переводит три тетраэдра в октаэдр (см. схему на рис.11). Поэтому все три спирали,

извлеченные из четырехмерного аналога икосаэдра в нашей статье, опубликованной в предыдущем номере «Природы» (рис.6, 11 и 14), переходят друг в друга при переброске различных систем общих для трех тетраэдров ребер. Там мы уже писали, что извлекаемые из политопа спирали реализуются в некоторых кристаллических структурах металлов и солей и, скорее всего, в металлических расплавах и стеклах [9], что и объясняет высокую плотность упаковки атомов в металлических стеклах, практически совпадающую с плотностью кристаллической упаковки. На рис.12 показана микро-

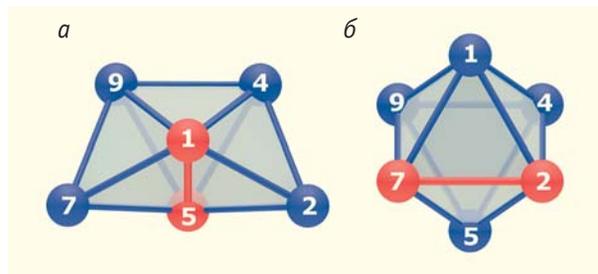


Рис.11. Замена общего для трех правильных тетраэдров (красного) ребра 1-5 в ромбе 1-2-5-7 (а) на ребро 7-2 порождает правильный октаэдр (б).

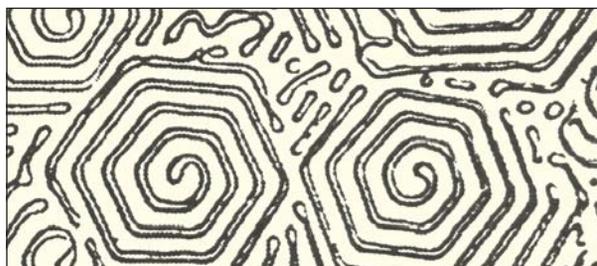


Рис.12. Спиральный рост пластинчатых кристаллов  $MgZn_2$  из расплава  $Zn + 3\%Mg$ . Оптическая микроскопия [10].

фотография металлического сплава Mg-Zn, подтверждающая эту гипотезу: мы видим спиральный рост кристаллов интерметаллического соединения  $MgZn_2$  при эвтектическом затвердевании [10, 11], т.е. при сопряженном росте сразу двух разных кристаллов из одного расплава. Такой рост можно объяснить, скорее всего, наследованием спиральной упаковки атомов в исходном расплаве, подобно хорошо известному спиральному росту монокристаллов на винтовой дислокации.

## Границы кристаллографии расширились

Надо сказать, что в первой статье мы уже использовали систему Штайнера, но другую: в демонстрации вывода семивершинного кластера с помощью поля Галуа порядка 2 участвовало семивершинное разбиение тора на треугольники, т.е. разбиение семерки чисел на тройки. Оно реализует систему Штайнера  $S(2, 3, 7)$ , поскольку любые два числа из семерки входят только в одну тройку (ребро треугольника принадлежит только одному треугольнику), а каждое число по отдельности встречается в трех тройках (каждая вершина — трем).

Приведенные примеры показывают универсальность подхода к превращениям в рамках обобщенной кристаллографии, которую можно определить как структурное приложение алгебраической геометрии. Оказалось, что для выполнения всех рассмотренных превращений достаточно кластера с «некристаллографическим» числом вершин 11. Мы видим также, что одна и та же симметричная конструкция описывает строение металлов и их превращения и строение биополимеров (аль-

фа-спирали и некоторых видов ДНК). Появились работы по так называемому биомартенситу, когда изучаемые изменения некоторых биологических объектов представляются как мартенситные превращения [12]: полиморфные превращения в цилиндрических кристаллах белков моделируют жизненные функции примитивных биологических систем, в частности движение бактериофагов в жидкой среде. Интересно, что и здесь архитектура бактериофага описывается как 11-витковая спираль. Итак, расширяя симметричный базис кристаллографии до конструкций алгебраической геометрии, мы можем определенно утверждать: обобщенная кристаллография не только способна описать строение конденсированных фаз, но и содержит информацию о превращениях этих фаз. Аппарат комбинаторики, впервые использованный нами для анализа превращений в металлах, давно и широко применяется в криптографии и дешифровке текстов. Система Штайнера  $S(4, 5, 11)$  — грамматика языка с алфавитом из 11 букв и словами по пять букв в каждом. Поэтому мы можем сказать в заключение, что полиморфные превращения в металлах — некий аналог перекодировки текста.

Здесь были показаны возможности симметричного (геометрического) подхода к решению сложных физических задач строения конденсированных фаз и превращений этих фаз. Это далеко не единственный пример решения физической задачи геометрическими методами: достаточно вспомнить нахождение центра тяжести произвольного треугольника как пересечения его медиан. Прочитируем математика Дэвида Гильберта: «Геометрия — предельный случай физики, когда масса равна нулю». ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 14-02-00079.**

## Литература

1. Холл М. Комбинаторика. М., 1970.
2. Talis A., Kraposhin V. Finite noncrystallographic groups, 11-vertex equiedged triangulated clusters, and polymorphic transformations in metals // Acta Cryst. 2014. V. A70. P.616—625.
3. Coxeter H.S.M. Regular polytopes. NY., 1973.
4. Sevov S.C., Corbett J.D. A remarkable hypoelectronic Indium cluster in  $K_8In_{11}$  // Inorg. Chem. 1991. V. 30. P. 4877—4880.
5. Шуберт К. Кристаллические структуры двухкомпонентных фаз / Пер. с нем. В.Б.Баранова, М., 1964.
6. Lipscomb W.N. Framework rearrangement in boranes and carboranes // Science. 1966. V.153. №3734. P.373—378.
7. Kraposhin V.S., Pankova M.N., Talis A.L., Freiman Yu.A. An application of a polytope (4D-polyhedron) concept for the description of polymorphic transitions: iron martensite and solid oxygen // J. Phys. IY France. 2003. V.112. P.119—122.
8. Kraposhin V., Talis A., Jakovleva I. et al. Microtwinning as a common mechanism for the martensitic and pearlitic transformations // J. of Alloys and Compounds. 2013. V.577S. P.S30—S36.
9. Kraposhin V.S., Talis A.L., Samoylovitch M.I. Axial (helical) substructures determined by the root lattice E8 as generating clusters of the condensed phases // J. Non-Cryst.Sol. 2007. V.353. P.3279—3284.
10. Fullman R.L., Wood D.L. Origin of spiral eutectic structures // Acta Metallurgica. 1954. V.2. P.189—193.
11. Scheil E. Über die eutektische Kristallisation // Z. für Metallkunde. 1946. V.37. P.1—11.
12. Olson G. B., Hartman H. Martensite and life: displacive transformations as biological processes // J. de Physique. 1982. T. 43. Colloque C4. Suppl. au №12. P.C4-855—865.

# Устья рек Байкала

Т.Г.Потемкина

**Б**айкал — один из крупнейших природных резервуаров пресной воды в мире (около 20% всех запасов). Уникальная вода этого озера чиста и прозрачна, обогащена кислородом, характеризуется малой минерализацией (~100 мг/л) и отсутствием органических примесей. В 1996 г. Байкал был внесен в список природных объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Сохранить природу Байкала в современных условиях — важнейшая задача. Уже сегодня на планете возникла нехватка питьевой воды. Эта проблема связана как с изменениями климата, так и с деятельностью человека, приводящей к загрязнению, деградации пресноводных экосистем, бесконтрольной урбанизации, изменениям в землепользовании и т.п.

На экологическое состояние Байкала большое влияние оказывает речной сток. Реки приносят в озеро не только наносы и питательные вещества, но и загрязнение. Пограничными районами между приемным водоемом и речными бассейнами служат устьевые области рек. Это целые природные системы, формирующиеся в результате сложных гидролого-морфологических, гидрохимических и биологических процессов, происходящих при взаимодействии вод реки и водоема. Устья рек — наиболее уязвимые объекты озерной системы, они в первую очередь откликаются на природные и антропогенные изменения речного стока и уровня озера. Но процессы



*Татьяна Гавриловна Потемкина, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Область научных интересов — озеро Байкал, его береговая зона и устьевые области рек, гидролого-морфологические и литодинамические процессы.*

в устьях и сами могут оказывать влияние на режим водоема. Усиливающееся влияние глобальных и региональных природных изменений, а также антропогенных воздействий на сток рек и уровни водоемов приводит к перестройке режима устьевых областей. Сток воды и наносов изменяется, выдвигание дельт замедляется, а в ряде случаев сменяется отступанием и деградацией. При этом в устьевых областях происходят более сильные и негативные изменения режима, чем в реках и водоемах. Следовательно, при освоении речных бассейнов или проведении любых крупных хозяйственных мероприятий необходимо учитывать возможные экологические последствия для устьев рек. Сегодня становится очевидной важность изучения устьевых областей и происходящих здесь гидролого-морфологических процессов. Такие исследования представляют большой научный, экологический и практический интерес, они востребованы в целях рационального природопользования и охраны уникальных природных объектов на границах крупных водоемов и впадающих в них рек.

Гидролого-геоморфологические процессы в устьевых областях рек Байкала остаются почти неизученными. При этом за последние полвека в них под воздействием изменений окружающей среды тоже происходили необратимые трансформации. Растет с каждым годом антропогенная (рекреационная) нагрузка на береговую зону Байкала и устьевые области впадающих в него рек.

Для определения современного состояния и перспектив дальнейшего развития (а такие оценки ранее не проводились) устьевых областей байкальских рек, а также в целях их рационального использования и охраны начато детальное изучение устьевых процессов и составление классификации типов речных устьев и их составных частей.

© Потемкина Т.Г., 2014

Выполнение классификации стало возможным благодаря предложенной в 2012 г. новой гидролого-морфологической типизации устьев рек [1]. Кроме того, использовались фотографии и космические снимки устьевых областей и их частей, а также карты разного масштаба, выпущенные в 1900-х и 1950–70-х годах.

Байкал — рифтовое озеро. Его возраст около 25 млн лет. Объем котловины 23 тыс. км<sup>3</sup>, площадь водного зеркала 31.5 тыс. км<sup>2</sup>. Длина озера 636 км, ширина изменяется от 25 до 80 км.

Общая площадь бассейна (не считая акватории Байкала) составляет 545 тыс. км<sup>2</sup>. В пределах России находится 45% площади водосбора Байкала, остальная часть — на территории Монголии [2]. Отношение площади акватории к площади водосбора составляет 1:17, что свидетельствует о существенной роли суши в питании озера, и главное звено в этом процессе — речной сток.

Бассейн Байкала отличается преимущественно горным рельефом с высотами от 456 до 2840 м. Хребты вытянуты параллельно котловине озера и ориентированы главным образом с юго-запада на северо-восток. Бассейн расположен в умеренном климатическом поясе с резко континентальным типом климата. Многолетняя средняя годовая температура воздуха здесь составляет –3.7°. Наибольшее количество осадков выпадает в горах

(средняя годовая их сумма 1300 мм), наименьшее (250–300 мм) — в долинах рек Селенги, Баргузина, Уды, на о.Ольхон и в дельте р.Селенги. На теплый период года (май–сентябрь) приходится 80–90% годовой суммы осадков. В бассейне озера широко развита многолетняя мерзлота.

В Байкал несут свои воды около 500 водотоков. Основные реки (самые крупные по протяженности, стоку воды и наносов) впадают в озеро с восточной стороны. Их водосборы выделены в большую питающую провинцию и связаны с водоемом только через устья рек. Эта провинция в сумме занимает более 90% площади водосбора озера. Крупнейшая из здешних рек — Селенга (82% площади водосбора), среди других — Баргузин (3.8%), Верхняя Ангара (3.9%) и Турка (1.1%), относящиеся к категории средних рек. Малая питающая провинция Байкала — это узкая полоса побережья и обращенные к Байкалу склоны окружающих хребтов. Большая часть рек малой провинции имеет горный характер.

Очевидно, что происходящие почти на всей территории бассейна Байкала изменения природного и антропогенного характера находят отражения в многолетних данных по стоку воды и наносов впадающих в него рек. Эти изменения влияют на устьевые процессы, а те в свою очередь сами оказывают воздействие на режим озера.

Таблица 1

## Характеристики рек Байкала

Река	Длина реки/ площадь водосбора, км/км <sup>2</sup>	Категория реки	Средние за период наблюдений	
			Сток воды, км <sup>3</sup> /год	Сток наносов, тыс. т/год
<b>Малая питающая провинция</b>				
Голоустная	122/2300	С	0.29	0.69*
Бугульдейка	80/1720	М	0.17	0.51*
Анга	99/1010	М	0.081	2.1*
Сарма	66/787	М	0.14	0.82*
Рель	50/579	М	0.42	2.7*
Тья	120/2580	С	1.24	14*
Давша	29/93.7	М	0.029	0.03*
Кика	107/2010	С	0.72	13*
Большая Сухая	33/(379)	М	0.13	1.1*
Большая Речка	77/656	М	0.39	4.9*
Мысовая	30/151	М	0.091	0.72*
Снежная	173/3020	С	1.49	47
Хара-Мурин	86/1150	М	0.76	14.5
Утулик	86/965	М	0.53	31.5
Слюдянка	20/(56.3)	СМ	0.026	7.1
Большая Половинная	44/(356)	М	0.080	0.19*
<b>Большая питающая провинция</b>				
Селенга	1024/447060	Б	28.1	1735
Верхняя Ангара	438/21400	С	8.44	274
Баргузин	480/21100	С	3.97	107
Турка	272/5870	С	1.63	24*

Пояснения: СМ — самые малые реки (длиной менее 25 км); М — малые реки (26–100 км); С — средние реки (101–500 км); Б — большие реки (длиной более 501 км); \* — данные по стоку взвешенных наносов [3].

## Особенности устьевых областей

Природный комплекс устьев рек Байкала формируется в результате сложных гидролого-морфологических процессов: динамического взаимодействия и смешения вод реки и озера, морфодинамики дельты и дна устьевого взморья, русловых процессов в рукавах и протоках и дельтообразования в целом.

Природные условия Байкальского региона, а также крупные хозяйственные мероприятия, проводимые в нем, определили ряд особенностей в развитии устьев впадающих в Байкал рек.

Берега Байкала делятся на два типа: ровные и бухтовые. Их контур и в целом борта котловины озера определяются тектоническими разломами [4]. Наиболее ровным считается западный берег, вдоль которого на сотни километров протянулся Обручевский сброс. Здесь многочисленны крупные мысовые выступы, представляющие конусы выноса в устьях протяженных долин или рек. Эти мысы либо далеко вдаются в озеро, принимая полукруглую форму, либо выступают слабо и содержат в себе вложенные устья. Новейшие тектонические процессы (поднятия, растрескивания, погружения и проседания отдельных блоков Байкальской впадины) несомненно оказывают влияние на формирование устьевых областей рек, впадающих в озеро. Частые землетрясения (700—800 в месяц) ускоряют процессы тектонического опускания впадин (где как раз расположены некоторые устьевые области, и в частности дельты) и интенсивность уплотнения дельтовых отложений, что в конечном итоге отражается на процессах в устьях.

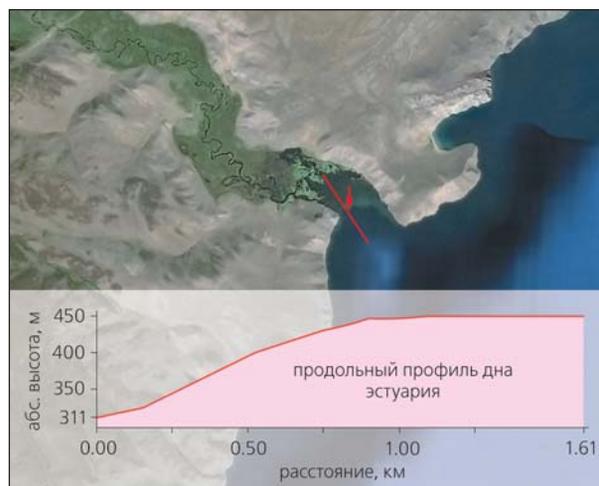
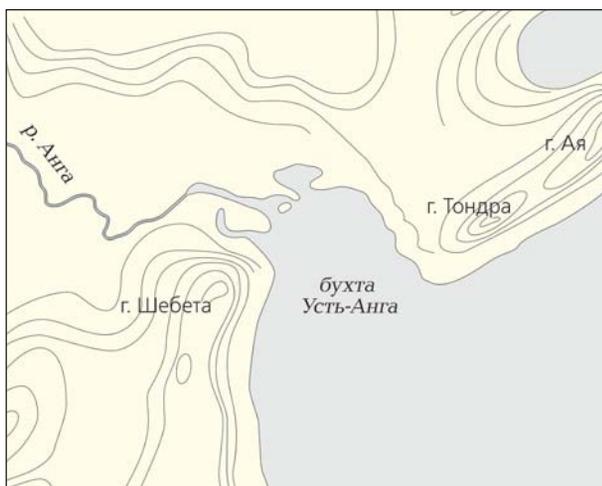
Кроме тектонических факторов на сток байкальских рек влияют климатические характеристики региона, а также общее потепление климата. Связанное с ним изменение режима речного стока

приводит к переформированиям в устьях. Так, со второй половины 1970-х годов на реках Байкала наблюдается уменьшение стока наносов на 48—81%, в то время как водоносность рек увеличивается (до 5.3%). Исключением стала р.Селенга, сток воды которой уменьшился на 3.2% [5]. Бассейн Селенги простирается далеко на юг и охватывает районы с разными климатическими условиями (умеренно влажные, сухие и очень сухие). По площади преобладают (более 80%) территории, испытывающие дефицит влаги, который в условиях потепления климата усиливается и влияет на водоносность реки. Связанная с потеплением деградация мерзлоты в Байкальском регионе способствует появлению дополнительной влаги и увеличению водоносности рек [5]. Уменьшение стока наносов в реках Байкала приводит к переформированиям в устьях (например, Верхней Ангары) и в береговой зоне озера. Кроме природных факторов на этот процесс влияет и антропогенная деятельность.

На Байкале широко известны три случая грандиозного антропогенного вмешательства в естественное состояние его природной системы. Это строительство Кругобайкальской железной дороги (1896—1905), Иркутской ГЭС (1959—1962) и Байкало-Амурской магистрали (1972—1984). Самым значимым воздействием на экосистему озера было антропогенное повышение его уровня в среднем на 0.8 м в результате возведения Иркутской ГЭС. Это привело к целому ряду геоэкологических последствий в первую очередь в береговой зоне озера и устьях рек. Были подтоплены низменные участки и устьевые области, ускорились заболачивание и частичное разрушение естественных перемычек (кос, береговых баров), отделяющих мелководные заливы (лагуны, соры) от озера, усилились абразия и геодинамические процессы в береговой зоне. Уже более 50 лет (с 1962 г.) уровень озера ре-



Устьевая область р.Верхняя Ангара в 1974 (слева) и 2013 гг. Красными линиями показаны промоины, образовавшиеся в теле берегового бара Ярки.



Устьевая область р.Анга в 1902 (слева) и 2013 г. На космическом снимке Google Earth изображен продольный профиль дна эстуария (красной линией показано местоположение линии профиля). На фотографии (внизу) желтой стрелкой отмечены подводные очертания бывшего пляжа (здесь и далее фото с сайта <http://nature.baikal.ru/>).

гулируется работой Иркутской ГЭС и устьевые области рек находятся в условиях антропогенного (техногенного) воздействия. С 2001 г. постановлением Правительства РФ в целях охраны берегов озера, в том числе устьевых областей, колебания уровня Байкала ограничены метровым диапазоном. Несмотря на это, последствия техногенного повышения уровня будут сказываться и в будущем. Так, в северной части Байкала, в устье Верхней Ангары, произошли существенные переформирования. В последние десятилетия здесь происходят необратимые процессы — озерный край дельты отступает, увеличивается площадь акватории устьевой лагуны, а отделяющий ее от озера песчаный береговой бар интенсивно размывается и в будущем может полностью исчезнуть [6]\*. Причиной

таких изменений в устье Верхней Ангары послужило совместное действие природных и антропогенных факторов.

В результате техногенного повышения уровня воды Байкала оказалась подтопленной устьевая область р.Анга. Сегодня под водой сохранились очертания бывшего пляжа. Изменения произошли и в устьевой зоне р.Голоустная. Если в начале 1900-х годов в дельте существовало шесть рукавов, то в настоящее время осталось лишь три. В устье Голоустной активно развивается туристическое дело. В настоящее время растет и усиливается часто бесконтрольный прессинг рекреационных мероприятий на устья рек и прилегающее побережье Байкала. Например, в устьевой области р.Турка ведется строительство особой экономической зоны, цель которой — круглогодичный туризм. Укрепляются берега, строятся причалы и другие инженерные сооружения, углубляется русло реки. Это, очевидно, повлечет за собой изменения гидролого-

\* Подробнее об этой природной катастрофе можно прочитать в статье «Исчезающий остров Байкала» (Природа. 2011. №5. С.32—38).



Устьевая область р.Голоустная в 1902 (слева) и 2013 гг.



Устьевая область р.Турка и проект планируемой здесь особой экономической зоны «Байкальская гавань».

морфологических процессов в устье, которые приведут к активизации экзогенных процессов в береговой зоне озера. Таким образом, с интенсивным вовлечением природных ресурсов в хозяйственный оборот деятельность человека оказывает все большее воздействие на устьевые процессы, которые в свою очередь влияют на режим озера.

### Маргинальные фильтры

В процессе перемещения речных наносов в водоем устьевым областям принадлежит роль так называемых маргинальных фильтров. Это зоны, в которых происходит кардинальная перестройка структуры потока речного материала на границе

река—водоем. В маргинальных фильтрах преобразуются как терригенная составляющая поступающего из рек материала, так и его взвешенная, коллоидная и растворенная части. Наиболее обоснованные и детализированные представления о механизме этого явления даны А.П.Лисицыным [7, 8]. Маргинальный фильтр — уникальная и глобальная по масштабам система: ежегодно на планете в нее подается 35 550 км<sup>3</sup> речной воды, в которой содержится 18.5 млрд т взвешенных веществ, из них в пределах фильтра ежегодно осажается около 17 млрд т (92%). Здесь же осажается значительная часть (20—40%) растворенных в речной воде элементов и соединений. Столь мощный захват осадочного вещества системой маргинального фильтра приводит к седиментационному голоданию пелагических частей океана и к глубоким преобразованиям осадочного вещества, поступающего с суши. Поэтому устьевые области (области маргинальных фильтров), занимающие менее 10% поверхности океана и менее 0.5% по объему, забирают более 90% осадочного вещества, поступающего с суши [7, 8]. Таким образом, основная часть речного материала осажается на небольших по площади участках, прилегающих к устьям рек. Зоны действия маргинальных фильтров по праву считаются главными на Земле областями седиментации. Это открытие изменило сложившиеся ранее и считавшиеся классическими представления о закономерностях потоков вещества с суши в океан, о безусловном диктате речного стока. Данные многочисленных балансовых подсчетов, которые не учитывают явление маргинального фильтра, а также построения моделей седиментации и определения других средних показателей осадочного процесса, приходится считать ошибочными [7, 8].

Действие маргинальных фильтров следует принимать во внимание в литодинамических, седиментологических и экологических исследованиях.

Сток воды и наносов на реках Байкала измеряется, как правило, в створах, расположенных значительно выше устьевых областей, и фактически

означает приток к ним. Так, 59% от объема наносов, приносимых Селенгой к своей устьевой области, осажается в ее дельте, 41% выносится в озеро, из них около 30% поступает в донные осадки мелководья. Таким образом, в устьевой области Селенги осажается около 90% речного материала [10, 11]. Устьевая зона Верхней Ангары перехватывает, по предварительным данным, около 70% стока наносов [6]. Река Баргузин почти весь материал выносит в эстуарий — Баргузинский залив. В его прибрежной зоне осажается около 60% речных наносов, а 40% поступает в глубоководную часть и выходит в открытый Байкал. Роль маргинального фильтра Баргузина фактически выполняет Баргузинский залив. В устьевых областях рек наблюдаются максимальные скорости отложения наносов. Например, в устьевой области Селенги скорость осадконакопления составляет 1.9 мм/год, в то время как в глубоководном Байкале она на один-два порядка ниже [11]. С учетом действия маргинальных фильтров фактические значения притока речного материала в Байкал будут заметно отличаться от расчетных.

Итак, устьевые области рек — это маргинальные фильтры, где идет отделение и осаждение взвешенных и части растворенных форм вещества литосферы суши, а также разных форм загрязнений. Устья рек — природный защитный барьер для озера.

## Типы речных устьев

От гидролого-морфологического типа устьевых областей рек и их составных частей зависит степень влияния происходящих там процессов на режим озера. Согласно новой гидролого-морфологической типизации [1], зоны взаимодействия вод реки и озера могут состоять из четырех основных частей: устьевого участка реки, дельты, эстуария и устьевой зоны озера. Области, в состав которых входит дельта или эстуарий, целесообразно называть дельтовыми или эстуарными соответственно. Во многих устьях рек одновременно находятся и дельта, и эстуарий — они образуют сложные комплексы, в которых главным морфологическим элементом может быть как первый, так и второй объект. Такие устья подразделяют на эстуарно-дельтовые (где главный элемент — эстуарий, а в нем уже формируется дельта) и дельтово-эстуарные (когда дельта — главный элемент, а эстуарий образован в ее водотоках или проточных водоемах). Те устьевые области, в которых нет ни дельты, ни эстуария называют простыми.

Устьевые области рек большой питающей провинции по морфологическому строению представлены четырьмя типами. К простым относится устье р.Турка. Устьевая область р.Баргузин — эстуарного типа, здесь смешение речных и озерных вод происходит в глубоко вдающемся в сушу Бар-

**Таблица 2**

**Потери взвешенного вещества (в % от общего количества) на границе река—море [9]**

Река	Потеря взвешенных веществ, %
Амазонка	95
Миссисипи	90
Святого Лаврентия	93
Заир	95
Шельда	92
Хуанхэ	95
Кура	90-95
Реки бассейна Черного и Азовского морей	83

гузинском заливе. Река Верхняя Ангара имеет дельтово-эстуарную устьевую область, к дельте примыкает эстуарий — крупная устьевая лагуна (залив) Ангарский Сор, отделенная от озера низким песчаным береговым баром Ярки. Дельта Верхней Ангары относится к так называемым дельтам выполнения заливов. Устьевая область Селенги — дельтового типа с дельтой выдвигания на открытом отмелем взморье (прибрежная зона) со свалом глубин. Дельта — это сформированная в результате литодинамических процессов часть устьевой области реки, включающая верхнюю, подверженную руслоформирующей деятельности речного потока, толщу устьевого конуса выноса реки и надводную аллювиальную сушу, обычно имеющую сложную, изменчивую гидрографическую сеть и специфический «дельтовый» ландшафт. Собственно дельты, без признаков эстуария, типичны для рек, впадающих во внутренние моря и озера, не подверженные влиянию приливов, к которым и относится Селенга.

Малую питающую провинцию озера составляют в основном малые реки, устья которых выделены по морфологическому строению в три типа. Семь устьевых областей рек малой питающей провинции относятся к простому, столько же — к дельтовому, а еще две — к эстуарно-дельтовому типу. Устье р.Анга — эстуарно-дельтового типа,

в вершине эстуария формируется дельта выполнения. Эстуарно-дельтовая устьевая область Большой Речки имеет эстуарий — лагуну Малый Посольский Сор, к которому примыкает дельта реки, относящаяся к классу дельт выполнения. Устьевые области рек дельтового типа представлены дельтами выдвигания с разной степенью выдвинутости в озеро.

Эстуарий — составная часть устьевых областей некоторых рек. Это полузамкнутая система водных объектов, хотя бы периодически сообщаемая с озером. В эстуариях действуют общие для всей системы процессы смешения речных и озерных водных масс. На Байкале эстуарии присутствуют в устьях четырех рек — Анги, Большой Речки, Верхней Ангары и Баргузина. В соответствии с типизацией В.Н.Михайлова [1], по главным признакам (морфологическому и генетическому) эстуарии подразделяются на три типа: речные, лагунные и морские. В каждом типе выделяется несколько подтипов в соответствии с особенностями протекающих в эстуариях гидролого-морфологических процессов. К типу лагунных и подтипу *собственно лагунных* относятся эстуарии Верхней Ангары и Большой Речки. Происхождение и формирование таких эстуариев связаны преимущественно с волнением и движением наносов в прибрежной зоне, благодаря которым

Таблица 3

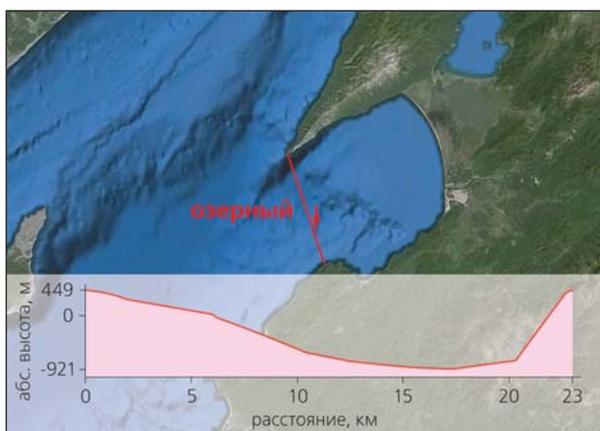
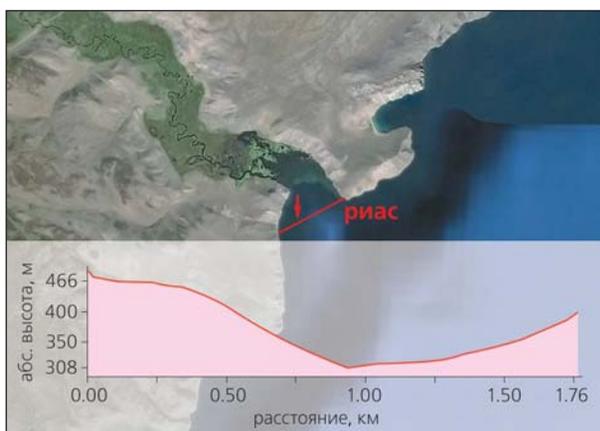
## Гидролого-морфологическая типизация устьев рек Байкала

Река	Тип устьевой области	Количество устьев основных водотоков	Состав устьевой области
<b>Малая питающая провинция</b>			
Голоустная	Д	3	Д–УЗО
Бугульдейка	Д	1	Д–УЗО
Анга	ЭД	1	Д–Э–УЗО
Сарма	Д	3	Д–УЗО
Рель	Д	3	Д–УЗО
Тья	Д	2	Д–УЗО
Давша	П	1	УУР–УЗО
Кика	П	1	УУР–УЗО
Большая Сухая	П	1	УУР–УЗО
Большая Речка	ЭД	2	Д–Э–УЗО
Мысовая	П	1	УУР–УЗО
Снежная	П	1	УУР–УЗО
Хара-Мурин	Д	4	Д–УЗО
Утулик	Д	3	Д–УЗО
Слюдянка	П	1	УУР–УЗО
Большая Половинная	П	1	УУР–УЗО
<b>Большая питающая провинция</b>			
Селенга	Д	7	Д–УЗО
Верхняя Ангара	ДЭ	2	Д–Э–УЗО
Баргузин	Э	1	УУР–Э–УЗО
Турка	П	1	УУР–УЗО

Пояснения: тип устьевой области: Д — дельтовый, ЭД — эстуарно-дельтовый, ДЭ — дельтово-эстуарный, П — простой; состав устьевой области: УУР — устьевой участок реки, Д — дельта, Э — эстуарий, УЗО — устьевая зона озера.

**Таблица 4**  
**Гидролого-морфологическая типизация эстуариев**

Река	Тип эстуария	Подтип эстуария	Название эстуария	Площадь эстуария, км <sup>2</sup>
Верхняя Ангара	лагунный	собственно лагунный	Ангарский Сор	109
Большая Речка	лагунный	собственно лагунный	Малый Посольский Сор	2.1
Баргузин	озерный	собственно озерный	Баргузинский залив	765
Анга	озерный	риасовый	залив Усть-Анга	2.1



Эстуарии разных типов и профили поперечного сечения рельефа их дна (красной стрелкой показаны положения линий профилей) рек Анги (вверху), Баргузина (в центре) и Верхней Ангары.

в устьях сформировались аккумулятивные образования (береговые бары, косы), отчленяющие лагуны от озера. Собственно лагунные эстуарии похожи на небольшие мелководные озера, вода в которых хорошо перемешивается ветровым волнением, а сами они относительно свободно сообщаются с открытым озером через промоины в береговых барах и косах. Основное отличие лагунных эстуариев от эстуариев других типов состоит в том, что гидролого-морфологические процессы в них так или иначе связаны с динамикой аккумулятивных форм, отделяющих эти объекты от озера.

К эстуариям морского (а для Байкала — озерного) типа относятся устья рек Баргузин и Анга, впадающих в крупные заливы. В них зона смешения речных и морских (озерных) водных масс происходит в основном в привершинной части, которую и следует считать эстуарием. Отличительные особенности морских эстуариев — их тесная связь с основным водоемом и относительно слабое влияние на них речного стока. Морские эстуарии условно разделены на три подтипа [1]: *собственно морские* (обычно в устьях средних и больших рек), *фьордовые* и *риасовые\** (в устьях малых рек). К *собственно морскому* (озерному) подтипу по всем морфогенетическим признакам и особенностям протекающих в нем гидролого-морфологических процессов относится Баргузинский залив — эстуарий в устье р.Баргузин. Риасовый эстуарий р.Анга, как и все эстуарии этого подтипа, имеет значительно вытянутую вдоль своей оси форму.

Следует заметить, что, хотя различия между типами и подтипами эстуариев велики, их определение не всегда бывает легким. Связано это как со сложностью морфологического строения устьевых областей рек, так и с возможностью перехода эстуария в процессе развития из одного подтипа в другой.

\* \* \*

Устьевые области рек Байкала развиваются в условиях новейшего тектонического процесса, частых в Байкальской рифтовой зоне землетрясений, искусственной регуляции уровня воды в озере, глобального потепления климата и его регио-

\* Риасы — затопленные речные долины неледникового происхождения в горных областях [1].

нальных проявлений, а также возрастающей рекреационной нагрузки на ландшафты береговой зоны. Эти факторы приводят к переформированию в устьях рек и береговой зоне Байкала, влияя на режим озера.

Установлено, что на Байкале самыми распространенными типами устьевых областей рек могут считаться дельтовый и простой. В устьях больших и средних рек озера осаждаются около 60–90% речного материала. Дельтовые области, по предварительным данным, задерживают в своих пределах больше речных наносов, чем простые.

Современное состояние устьев рек, впадающих в Байкал, характеризуется: связанными с изменением стока воды и наносов переформированиями, подтоплением и отступанием дельт,

уменьшением количества дельтовых рукавов, размыванием береговых баров, увеличением акваторий эстуариев и усилением водообмена между ними и озером. Изменения процессов в устьях рек обусловлены как природными, так и антропогенными факторами, которые в разных районах бассейна Байкала проявляются по-разному и с различной интенсивностью.

Изучение устьевых процессов, выявление факторов, влияющих на эти процессы и вносящих изменения в их динамику, а также оценка масштабов изменений в устьях необходимы для анализа и прогноза состояния устьевых областей байкальских рек в целях рационального природопользования и охраны экосистем как устьев, так и самого озера. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 11-05-00140.**

## Литература

1. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей — эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т.39. №3. С.243—257.
2. Атлас Байкала. М., 1993.
3. Власова Л.К. Речные наносы бассейна озера Байкал. Новосибирск, 1983.
4. Уфимцев Г.Ф., Потемкина Т.Г., Скочина Т.М. и др. Геометрические рисунки берегов озера Байкал // География и природные ресурсы. 2009. №4. С.56—62.
5. Потемкина Т.Г. Тенденции формирования стока наносов основных притоков озера Байкал в XX веке и начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 2011. Т.12. С.63—71.
6. Потемкина Т.Г., Ярославцев Н.А., Петров В.А. Гидролого-морфологические особенности устьевой области р.Верхняя Ангара // Водные ресурсы. 2012. Т.39. №4. С.367—376.
7. Лисицын А.П. Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана // Океанология на старте XXI века. М., 2008. С.159—224.
8. Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М., 1988.
9. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М., 1983.
10. Потемкина Т.Г. Литодинамика прибрежной зоны озера Байкал. Автореферат дисс. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2000.
11. Потемкина Т.Г., Фиалков В.А. Баланс наносов в дельте Селенги и их распространение в Байкале // Водные ресурсы. 1993. №6. С.689—692.

# Бактерия *Wolbachia* — «серый кардинал» мира насекомых

А.А.Струнов, М.В.Жукова, Д.А.Малькеева, Е.В.Киселева

Симбиоз (сосуществование неродственных организмов, согласно исходному определению немецкого миколога Антона де Бари) — фундаментальное явление природы. У некоторых видов взаимоотношения порой построены настолько сложно, что трудно поверить в реальность их существования. Многие симбионты контактируют на тканево-клеточном уровне (так называемые эндосимбиотические ассоциации), когда один из организмов живет внутри тела другого. Большой интерес у ученых вызывают взаимодействия эндосимбионтов на самом тонком, внутриклеточном уровне. Яркий пример таких тесных взаимоотношений — бактерии рода *Wolbachia*, формирующие ассоциации со многими беспозвоночными животными. Манипулирование репродуктивной системой хозяина, влияние на его жизнеспособность и поведение делают *Wolbachia* одними из самых распространенных и «искусных» бактерий на планете.

## Сферы влияния бактерий *Wolbachia*

Неизвестные бактерии, похожие на риккетсий, были обнаружены в 1924 г. в репродуктивных тканях обыкновенного комара (*Culex pipiens*) М.Гертигом и С.Вольбахом, когда они изучали разнообразие бактерий семейства Rickettsiaceae и их распространение в различных тканях насекомых [1]. Позже, в 1936 г. Гертиг назвал описанный вид *Wolbachia pipientis* в честь своего коллеги. Специфическая локализация этих микроорганизмов в яичниках и семенниках комаров, обнаруженная учеными, не вызвала тогда особого интереса у научной общественности. Лишь в 1971 г. произошло событие, давшее толчок изучению этих необычных бактерий: Дж.Йен и А.Барр обнаружили у комаров эффект цитоплазматической несовместимости, который вызывал гибель боль-

© Струнов А.А., Жукова М.В., Малькеева Д.А., Киселева Е.В., 2014

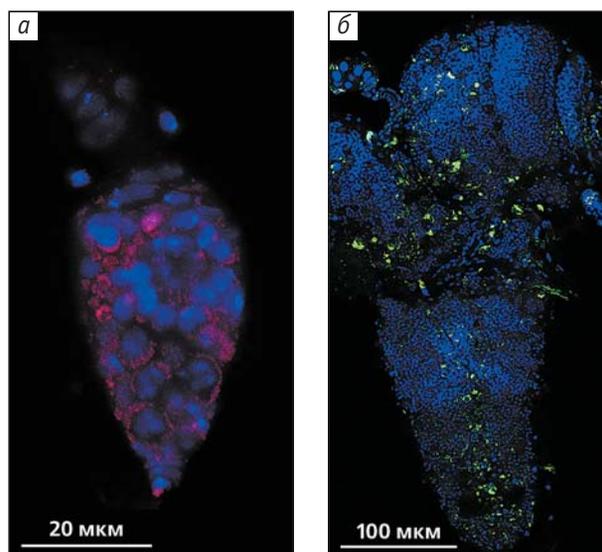


Рис.1. Бактерии *Wolbachia* инфицируют как репродуктивные органы, так и различные соматические ткани хозяев. Микрофотографии (конфокальная микроскопия) гермария яйцевой трубки яичника (а) и центральной нервной системы личинки третьего возраста (б) дрозофилы, зараженных *Wolbachia* штамма wMelPop. Бактерии слева окрашены красным, справа — зеленым с помощью флуоресцентной гибридизации *in situ*; ядра клеток показаны синим [6].

Здесь и далее фото авторов, полученные на базе Центра коллективного пользования микроскопического анализа биологических образцов ИЦиГ СО РАН

шинства потомков при скрещивании самцов, инфицированных бактериями *Wolbachia*, с неинфицированными самками [2]. На сегодняшний день получены многочисленные данные о разнообразных способах влияния бактерий *Wolbachia* на организм хозяина, что демонстрирует их невероятную способность приспосабливаться к окружающей среде.

Бактерии рода *Wolbachia* — граммотрицательные альфа-протеобактерии, относящиеся к порядку Rickettsiales. В состав рода входит только один вид *Wolbachia pipientis*. Два других вида *W.persica* (эндосимбионт клещей) и *W.melophagi* (паразит бескрылых кровососущих мух), изначально отнесенные к этому же роду, некоторое время спустя были из него исключены. По сравнению с близкородственными видами из порядка Rickettsiales, инфицирующими как млекопитающих, так и беспозвоночных, бактерии *Wolbachia* обнаруживаются только у последних. Их влияние распространяется на широкий круг членистоногих, а также на 16 видов нематод и может варьировать от мутуалистического (взаимовыгодного для обеих сторон) до паразитического. Передача инфекции из поколения в поколение происходит вертикально, от матери потомству, хотя известны случаи горизонтального переноса. Таким образом, основная стратегия существования *Wolbachia* внутри популяций беспозвоночных и продления бактерией своего рода — заражение репродуктивных органов хозяина, а именно яичников самки, принимающих непосредственное участие в производстве потомства (рис.1,*а*). Тем не менее бактерии обнаруживаются также во многих соматических тканях, например нервной, включая мозг, в мальпигиевых сосудах, жировом теле, кишечнике, а также в гемоцитах (клетках гемолимфы) насекомых (рис.1,*б*). Для развития *Wolbachia* расположение в этих тканях — априори тупиковое, поскольку лишает бактерий возможности передачи в следующее поколение. Однако, судя по последним данным, эти микроорганизмы, даже находясь вне репродуктивных тканей, могут опосредованно обеспечивать успешное продолжение своего рода.

Бактерии присутствуют внутри клеток хозяина и обычно имеют палочко- или кокковидную



**Антон Александрович Струнов**, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории морфологии и функции клеточных структур Института цитологии и генетики (ИЦиГ) СО РАН. Область научных интересов — микробиология, внутриклеточные симбионты членистоногих, нейробиология.



**Мария Владимировна Жукова**, кандидат биологических наук, научный сотрудник той же лаборатории. Занимается исследованием симбиотических бактерий беспозвоночных, кишечной микрофлоры, дрозофил и муравьев-листорезов.



**Дина Александровна Малькеева**, аспирант Новосибирского государственного университета, инженер научно-образовательного отдела ИЦиГ СО РАН. Научные интересы связаны с микробиологией, генетикой дрозофилы, белками теплового шока.



**Елена Владимировна Киселева**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории морфологии и функции клеточных структур ИЦиГ СО РАН. Область научных исследований — функциональная организация и динамика ядерных структур, функциональная роль эндосимбиотических бактерий *Wolbachia*, свойства эмбриональных стволовых клеток.

форму, их длина 1 мкм, а диаметр 0.5 мкм (рис.2,*а,б*). Оболочка этих бактерий состоит из трех слоев: внутренней плазматической мембраны, клеточной стенки и внешней мембраны хозяйского происхождения. Именно последняя, образуемая за счет использования аппарата клетки хозяина, помогает бактериям «прятаться» от агрессивного воздействия различных внутриклеточных ферментов. В матриксе бактериальной клетки при ультраструктурном анализе выявляются тонкие нити ДНК, а также множество рибосом (рис.2,*в*). Мы, как

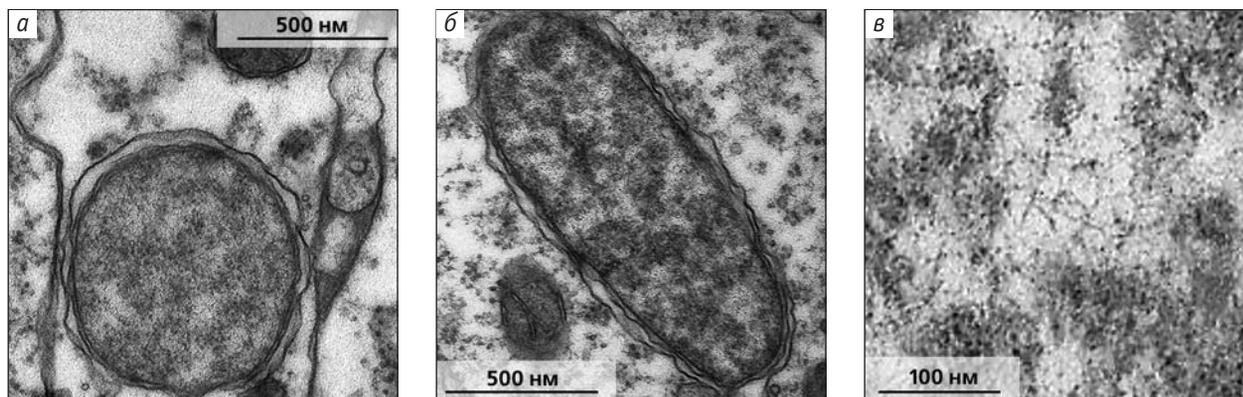


Рис.2. Микрофотографии (просвечивающая электронная микроскопия) *Wolbachia* в ткани эмбрионов саранчи *Podisma sapporensis*. Как правило, бактерии имеют кокко- (а) или палочковидную (б) форму с хорошо различимой оболочкой, состоящей из трех слоев, а в их матриксе много рибосом и нитей ДНК (в).

и другие исследователи, видим, что внутри клетки хозяина *Wolbachia* ведут себя довольно активно. Часто встречаются делящиеся бактерии и контактирующие с различными органеллами клетки: эндоплазматической сетью, митохондриями, ядром, аппаратом Гольджи и цитоскелетом (рис.3).

Основная причина широкого распространения бактерий *Wolbachia* среди множества членистоногих — способность влиять на репродуктивную систему хозяина, обеспечивая благоприятные условия для размножения эндосимбионта и передачи его в следующее поколение. Известны четыре модификации полового размножения, происходящие под влиянием бактерий: цитоплазматическая несовместимость, партеногенез, феминизация и андроцид\* [3].

Главная цель этих репродуктивных изменений — увеличение доли зараженных самок в популяции хозяина. В ходе эволюции цитоплазматические бактерии выработали различные способы уменьшить долю самцов в потомстве зараженных самок, ведь в мужских гаметах мало цитоплазмы, и поэтому бактерии, как правило, не могут передаваться от отца.

Цитоплазматическая несовместимость, самый распространенный эффект *Wolbachia*, возникает при скрещивании инфицированного самца со здоровой или инфицированной другим штаммом самкой. На уровне клетки это проявляется в нарушении конденсации мужского пронуклеуса и неправильном расхождении хроматид во время первого митоза после проникновения спермия в яйцеклетку, что в конечном итоге приводит к разрушению отцовских хромосом и нежизнеспособности потомства. Если самка заражена тем же самым штаммом бактерий, конденсация отцовских хромосом не нарушается, а из яйца благополучно развивается новая зараженная особь. Гибель эмбрионов в ре-

зультате цитоплазматической несовместимости варьирует от 0 до 100% в разных популяциях видов животных.

Партеногенез, вызываемый *Wolbachia*, приводит к увеличению количества «дочерей» в популяции хозяина с таким типом развития, при котором из оплодотворенных яйцеклеток развиваются самки, а из неоплодотворенных — самцы. Бактериальная инфекция направляет развитие яйца по женскому типу. Этот вариант репродуктивного паразитизма осуществляется у некоторых организмов (паразитических ос *Leptopilina clavipes* и различных видов наездников рода *Trichogramma*) за счет нарушения анафазы первого деления клетки во время раннего эмбрионального развития, в результате чего вместо двух гаплоидных ядер (из которых должны были бы развиваться самцы) образуется одно диплоидное (и получается самка). У других беспозвоночных (ос *Muscidifurax uniraptor*) первое митотическое деление проходит полностью, но затем полученные два ядра сливаются в одно, восстанавливая диплоидность, что приводит к развитию особи женского пола.

При феминизации бактерии *Wolbachia* «превращают» генетических самцов в самок, размножаясь в андрогенной железе самца, отвечающей за развитие семенников, в результате чего снижается ее функция. Это происходит, например, у мокриц. У некоторых видов, возможно, бактерии оказывают негативное влияние на работу генов, участвующих в определении пола.

Андроцид (гибель самцов) проявляется в высокой смертности особей мужского пола на личиночной стадии развития. Этот эффект характерен, в частности, для божьих коровок. Он обеспечивает выживающим самкам большую доступность питательных веществ в окружающей среде. Механизм андроцида до сих пор выясняется.

Бактерии *Wolbachia* помимо репродуктивных модификаций могут оказывать и другие воздействия на размножение и жизнедеятельность хозя-

\* Подробнее см.: Захаров И.А. Бактерии управляют половым размножением насекомых // Природа. 1999. №5. С.28—34.

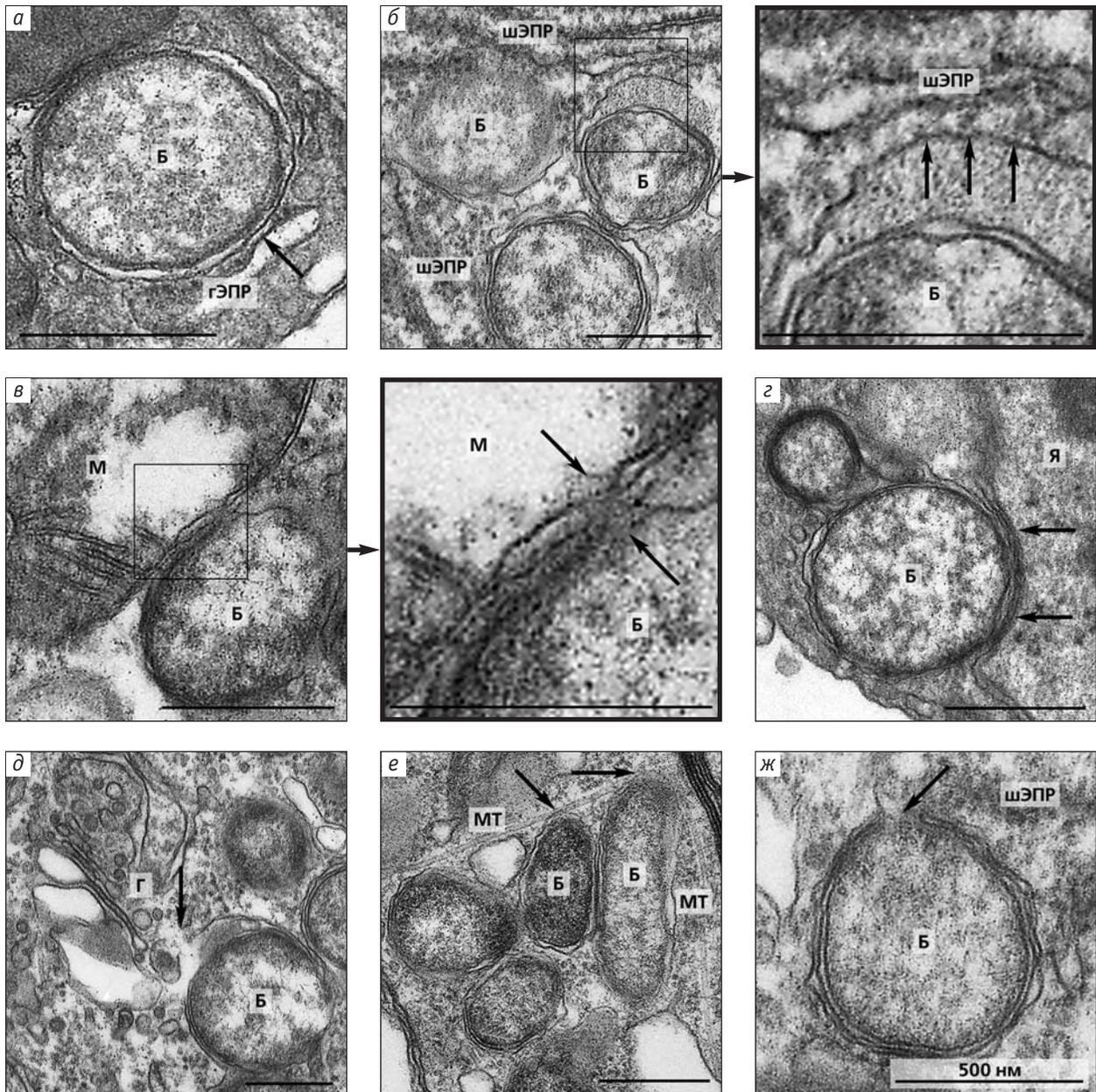


Рис.3. Бактерии *Wolbachia* активно контактируют с различными органеллами клетки хозяина. Микрофотографии (просвечивающая электронная микроскопия) *Wolbachia* в клетках мозга *Drosophila melanogaster*. Бактерии (Б) взаимодействуют с гладким эндоплазматическим ретикуломом (гЭПР) (а), рибосомами на мембране шероховатого ЭПР (шЭПР; справа — увеличенное изображение контакта — канала наподобие поры) (в), митохондриями (М; справа увеличено изображение контакта — канала наподобие поры) (в), ядром (Я) (з), цистернами аппарата Гольджи (Г) (д), микротрубочками (МТ) (е) клетки дрозофилы. *Wolbachia* «открывает» свою плазматическую мембрану перед шЭПР (ж). Места контакта показаны стрелками или выделены рамкой [4].

ина. Примером служит паразитическая оса *Asobara tabida*. Недавно обнаружили, что формирование ее яйцеклеток зависит от присутствия бактерий, которые, предположительно, влияют на процесс апоптоза, предотвращая гибель питающих клеток яичника и способствуя оогенезу [5]. *Wolbachia* могут оказывать как отрицательное, так и положительное действие на продолжительность жизни хозяина. Полученный в лаборатории пато-

генный штамм *wMelPop*, как выяснили мы и зарубежные коллеги, стремительно размножается в соматических тканях дрозофил (*Drosophila melanogaster*), включая мозг. Это приводит к разрушению клеток хозяина и существенно сокращает выживаемость инфицированных мух по сравнению со здоровыми (рис.4) [6, 7]. В нашей лаборатории также удалось доказать, что бактерии этого патогенного штамма увеличивают частоту

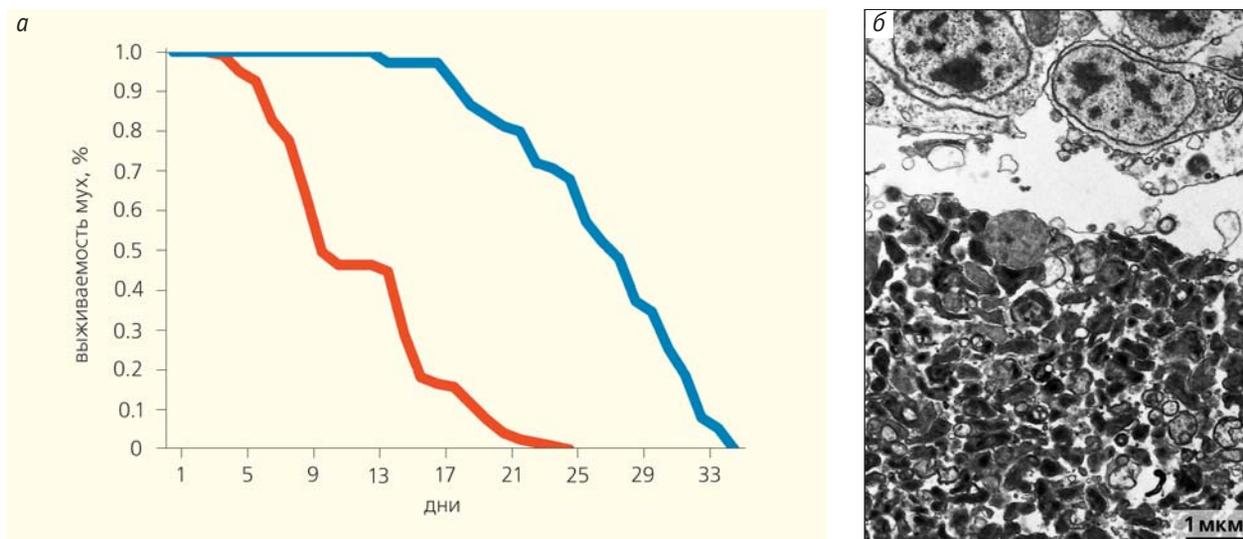


Рис.4. Активное размножение бактерий *Wolbachia* приводит к гибели плодовых мушек. Показаны кривые выживаемости инфицированной (красная) и здоровой (синяя) линий дрозофил, содержащихся при температуре 29°C (а), и микрофотография (просвечивающая электронная микроскопия) разрушенных клеток мозга мушки (б).

апоптоза в клетках яичника плодовой мушки [8]. Зато при 16°C некоторые инфицированные линии, наоборот, живут дольше здоровых [9].

Согласно последним данным, влияние *Wolbachia* не ограничивается одними репродуктивными модификациями и воздействием на жизнеспособность беспозвоночных. Бактерии обнаруживаются и в соматических клетках хозяина, а это открывает новые грани взаимоотношений внутри симбиотической ассоциации.

### Бактерии и иммунная система хозяина

Известно, что бактерии *Wolbachia* присутствуют в гемолимфе насекомых, а значит, могут непосредственно взаимодействовать с молекулами, секретируемыми в результате гуморального иммунного ответа хозяина [10]. Например, желтолихорадочные комары (*Aedes aegypti*), искусственно зараженные *Wolbachia* штамма *wMelPop*, демонстрируют повышенную устойчивость к инфекции паразитическими филяриями *Brugia pahangi*, вирулентным штаммом бактерий *Erwinia carotovora* и малярийным плазмодием *Plasmodium gallinaceum* [11, 12]. Помимо того, что *Wolbachia* усиливают противодействие инфекциям круглыми червями, бактериями и простейшими, они могут также мешать заражению хозяина вирусами. В природных популяциях *D.melanogaster* инфицированные мухи живут дольше, эффективнее справляясь с заражением РНК-вирусами DCV (*Drosophila C Virus*) и FHV (*Flock House Virus*), чем их здоровые сородичи [13]. Большое по своей значимости открытие недавно сделали австралийские ученые. Они установили, что заражение бактерия-

ми *Wolbachia* комара *A.aegypti*, основного переносчика вируса лихорадки Денге, затрудняет для последнего создание устойчивой популяции в тканях насекомого [13]. Обнаруженные эффекты, которые оказывает эндосимбионт на жизнедеятельность хозяина, открывают широкие перспективы использования *Wolbachia* в качестве биологического оружия для борьбы с различными насекомыми — переносчиками заболеваний человека и вредителями сельского хозяйства. В настоящее время бактерии уже применяются в нескольких тропических областях мира, чтобы победить лихорадку Денге.

### Внедрение в мозг хозяина

Особый интерес среди ученых, занимающихся исследованием бактерий *Wolbachia*, вызывает сейчас изучение способности этих эндосимбионтов управлять поведением хозяина. Такое влияние микроорганизмы могут оказывать как напрямую, через инфицирование специфических областей мозга, так и опосредованно — через заселение кишечника или жирового тела.

Мозг насекомых часто считают чем-то очень простым и несущественным. Иногда люди даже не предполагают, что у таких крошечных животных он вообще есть. Несмотря на то, что центральная нервная система млекопитающих намного больше по размеру и сложнее устроена по сравнению с насекомыми, у тех и у других процессы восприятия различных стимулов рецепторными клетками и передача нервных импульсов в специфические области мозга происходят сходным образом. Более того, у позвоночных и беспозвоночных в мозге об-

наруживаются идентичные по своим функциям участки. По эффективности использования ресурсов нервных клеток насекомые вообще занимают лидирующие позиции. У плодовой мушки рода *Drosophila* мозг состоит всего из 100 тыс. клеток, а у медоносной пчелы *Apis mellifera* их чуть меньше 1 млн (у человека их около 85 млрд), при этом у насекомых, особенно у общественных видов (муравьев, ос, пчел, шмелей и др.), выявляются очень сложные механизмы поведения, запоминания и восприятия информации. Дополнительно усложняет работу центральной нервной системы животных наличие в клетках мозга или в тканях эндосимбионтов, способных модифицировать поведение своих хозяев и вызывать нейродегенеративные расстройства.

Присутствие бактерий *Wolbachia* в клетках мозга насекомых уже не считается исключительным явлением. Эндосимбионтов нашли практически во всех отделах мозга дрозофилы (рис.5). В зависимости от штамма бактерии могут быть безвредными для своего «обладателя» или вызывать деграцию нервных клеток, бесконтрольно размножаясь в них [7, 15]. За время коадаптации с хозяевами *Wolbachia* выработали и закрепили уникальную способность неравномерно перемещаться из одной клетки в другую при делении нейронов мозга на стадии активного формирования центральной нервной системы эмбриона дрозофилы. Формирование нового нейрона или глиальной клетки у представителей рода *Drosophila* происходит из ганглиозной материнской клетки, образующейся при асимметричном делении нейробласта. При этом бактерии остаются в основном в формирующемся нейробласте и лишь

в небольшом количестве перемещаются в ганглиозную клетку. Во время метаморфоза личинки во взрослую особь происходит интенсивная перестройка нервной системы и многие нейроны гибнут в результате апоптоза. Оставаясь в нейробластах, бактерии с большей вероятностью попадают в клетки мозга взрослой мухи.

Асимметричное распределение бактерий при нейрогенезе приводит в конечном итоге к неравномерному расселению бактерий по всему мозгу. *Wolbachia* способны влиять на уровень нейромедиаторов в нервных клетках насекомых, в частности повышать уровень дофамина [16]. «Специфическое» распределение микроорганизмов, а также их воздействие на работу нейронов порождает много идей насчет возможного влияния бактерий на жизнедеятельность хозяина. Например, присутствие бактерий в нейронах антеннальных долей, отвечающих за обоняние у насекомого, может влиять на работу этих клеток, нарушая восприятие феромонов, и кардинально менять поведение животного в брачный сезон. Возможно, *Wolbachia* таким образом «настраивают» хозяев на распознавание «своих» и «чужих» особей, т.е. инфицированных тем же или отличающимся штаммом, чтобы избежать цитоплазматической несовместимости, ведущей к гибели потомства. Яркий пример такого тонкого взаимодействия внутри симбиотической ассоциации — тропические мухи *D.paulistorum*, среди которых есть несколько подвигов, инфицированных разными штаммами *Wolbachia* и не скрещивающихся между собой. Искусственное подавление бактериальной инфекции с помощью антибиотиков приводит к нарушению системы распознавания

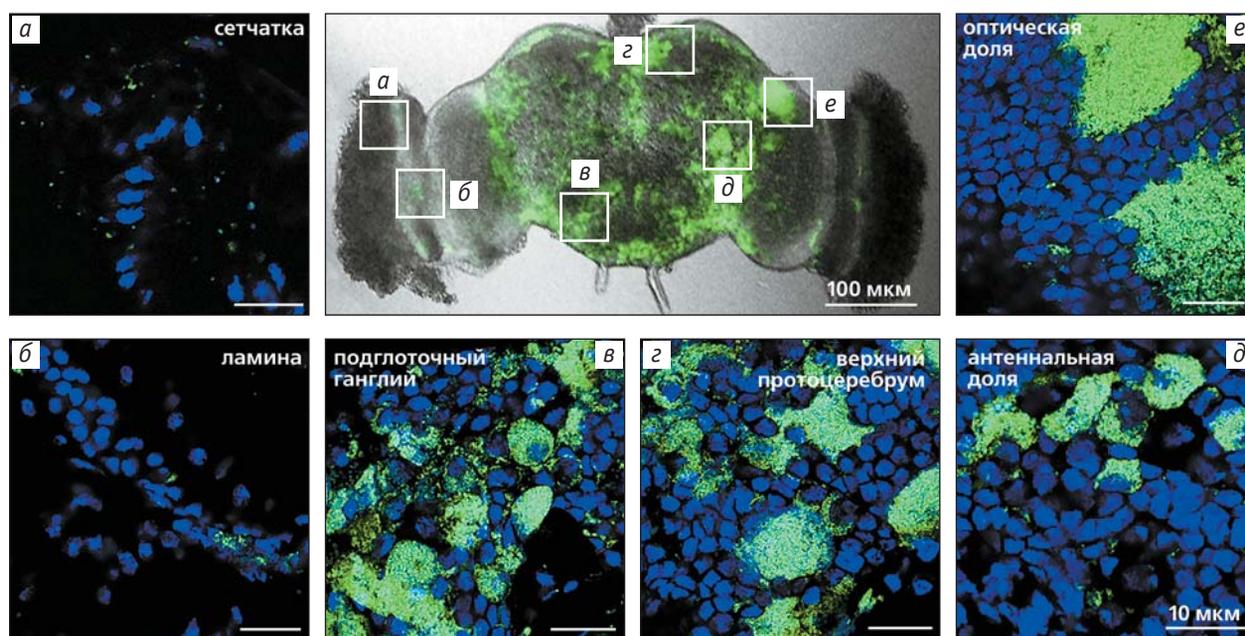


Рис.5. Бактерии *Wolbachia* инфицируют практически все области мозга дрозофилы (конфокальная микроскопия).

насекомого и образованию различных гибридных линий, как правило, не встречающихся в природе [17]. Инфицируя жировое тело насекомого, участвующее в образовании феромонов, бактерии *Wolbachia* могут изменять специфический набор так называемых кутикулярных углеводов, которые создают уникальный запах для каждого вида.

*Wolbachia* локализуются также в нейронах грибовидных тел насекомого. Эти парные структуры — один из самых важных центров мозга беспозвоночного. Они отвечают за формирование кратковременной и долговременной памяти, подобно гиппокампу человека. В этой же области происходит анализ сигналов, поступающих от центров обоняния — антеннальных долей. Наличие бактериальной инфекции, вероятно, может приводить к направленному изменению работы нейронов грибовидных тел и к формированию определенной картины долговременной памяти на феромоны для определения «своих» и «чужих» особей. Однако стоит отметить, что подобные взаимоотношения хозяина и симбионта — пока лишь гипотеза и не подтверждены экспериментально.

Приведенные нами примеры специфической локализации *Wolbachia* в клетках мозга насекомых и возможные последствия влияния бактериальной инфекции на поведение хозяина показывают, насколько тесно могут осуществляться взаимодействия в симбиотической ассоциации. Бактерии фактически выступают в роли кукловода, манипулирующего жизнедеятельностью насекомого ради продолжения собственного рода. Размножение различных бактерий, простейших и плоских червей в мозге животного и управление его поведением давно перестало быть сюжетом научной фантастики. Например, простейшие *Toxoplasma gondii* заселяют ткани мозга крыс. У грызунов полностью исчезает страх при восприятии запаха мочи их злейшего врага — кошки, и они становятся легкой добычей хищников [18]. Так паразит перемещается в ткани своего основного хозяина. Эти простейшие «ладят» и с людьми. Предположительно, результат такого «содружества» — замедление скорости реакции человека, что увеличивает риск попасть в дорожно-транспортное происшествие приблизительно вдвое.

## Жизнь в кишечнике

В кишечнике любого животного содержится большое количество разнообразных микроорганизмов, так или иначе взаимодействующих со своим хозяином и формирующих специфическое для конкретного вида сообщество, или микрофлору. Оно играет очень важную роль в развитии организма и в его жизнедеятельности. Изменения в составе кишечной микрофлоры могут влиять на многие физиологические процессы, а также вызы-

вать различные нарушения здоровья, от воспалительных процессов до ожирения [19]. Сейчас особое внимание уделяется взаимодействию микроорганизмов с центральной нервной системой хозяина (посредством нервных, эндокринных путей или иммунного ответа) и их влиянию на функции мозга и поведение животного. Происходит формирование так называемой оси «микрофлора — кишечник — головной мозг», которая может регулировать сознание, настроение, тревожность и болевые ощущения организма. Более того, заселение кишечника развивающегося млекопитающего определенной по составу микрофлорой влияет на развитие центральной нервной системы и последующее поведение животного [20].

Известно, что микроорганизмы в кишечнике насекомых играют важную роль в формировании предпочтений при выборе партнера для скрещивания. Мухи одного и того же вида, разделенные на две группы и содержащиеся на разных питательных средах даже в течение одного поколения, перестают скрещиваться с особями другой группы и предпочитают партнера, который кушал ту же еду [21]. Определенная диета вызывает изменение состава кишечной микрофлоры и, видимо, в соответствии с цепочкой связей между микрофлорой, кишечником и головным мозгом приводит к возникновению изоляционного барьера внутри популяции и начальному этапу видообразования. Недавние исследования, проведенные с помощью пиросеквенирования нового поколения, продемонстрировали, что в кишечнике 55% проанализированных насекомых разных видов (166 из 305 полученных образцов) содержатся бактерии *Wolbachia* [22]. Поэтому нельзя исключить их активное участие в поведении насекомых и влияние на выбор хозяевами партнера для скрещивания через ось «микрофлора — кишечник — головной мозг», однако доказательств на данный момент нет.

Итак, в природе существует огромное количество примеров тонкого взаимодействия партнеров симбиотической ассоциации. Все животные и растения вступают во взаимоотношения с микроорганизмами, коэволюционируют и формируют удивительные и уникальные по своей структуре формы симбиоза. Уже невозможно рассматривать эволюцию организмов без учета микробного сообщества, населяющего их ткани или клетки. В 2007 г. были впервые сформулированы принципы так называемой хологеномной теории эволюции, рассматривающие в качестве объекта естественного отбора не организм сам по себе, а ассоциацию микробов и организма — «холобионт» [23]. Положительные мутации закрепляются гораздо быстрее у симбиотических микроорганизмов, чем у их хозяев, что позитивно сказывается на приспособлении ассоциации в целом. Данная теория очень популярна среди многих ученых и подтверждается постоянно обновляющимися данными. Перечисленные выше примеры взаимоотношений *Wolbachia* и хозяина,

паразитное воздействие эндосимбионта на репродуктивную систему беспозвоночных и манипулирование их поведением несомненно поддерживают хологеномную теорию эволюции. Бактерии *Wolbachia* выступают в роли «серых кардиналов»

мира насекомых, незаметно, но влиятельно вмешиваясь в развитие и видообразование различных организмов. Это делает *Wolbachia* одними из самых уникальных бактерий, обнаруженных до сих пор в природе. ■

**Работа выполнена при поддержке бюджетного проекта ИЦиГ СО РАН (№VI.53.1.2).**

## Литература

1. Hertig M., Wolbach S.B. Studies of Rickettsia-like microorganisms in insects // J. Med. Res. 1924. V.44. P.329—374.
2. Yen J.H., Barr A.R. New hypothesis of the cause of cytoplasmic incompatibility in *Culex pipiens* L. // Nature. 1971. V.232. P.657—658. doi:10.1038/232657a0.
3. Werren J.H., Baldo L., Clark M.E. *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology // Nat. Rev. Microbiol. 2008. V.6. P.741—751. doi:10.1038/nrmicro1969.
4. Strunov A., Kiseleva E. *Drosophila melanogaster* brain invasion: pathogenic *Wolbachia* in central nervous system of the fly // Insect Sci. 2014. doi:10.1111/1744-7917.12187.
5. Pannebakker B.A., Loppin B., Elemans C.P. et al. Parasitic inhibition of cell death facilitates symbiosis // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007. V.104. P.213—215. doi:10.1073/pnas.0607845104.
6. Min K.T., Benzer S. *Wolbachia*, normally a symbiont of *Drosophila*, can be virulent, causing degeneration and early death // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1997. V.94. P.10792—10796. doi:10.1073/pnas.94.20.10792.
7. Strunov A., Kiseleva E., Gottlieb Y. Spatial and temporal distribution of pathogenic *Wolbachia* strain *wMelPop* in *Drosophila melanogaster* central nervous system under different temperature conditions // J. Invertebr. Pathol. 2013. V.114. P.22—30. doi:10.1016/j.jip.2013.05.001.
8. Zbukova M.V., Kiseleva E. The virulent *Wolbachia* strain *wMelPop* increases the frequency of apoptosis in the female germline cells of *Drosophila melanogaster* // BMC Microbiol. 2012. V.12. Suppl.1:S15. doi:10.1186/1471-2180-12-S1-S15.
9. Вайсман Н.Я., Голубовский М.Д., Илинский Ю.Ю. Различия в параметрах продолжительности жизни и ее пол-специфичности в популяциях человека и их моделирование на дрозофиле // Успехи геронтологии. 2013. №1. С.66—75.
10. Haselkorn T.S. The Spiroplasma heritable bacterial endosymbiont of *Drosophila* // Fly. 2010. V.4. P.80—87. doi:10.4161/fly.4.1.10883.
11. Kambris Z., Cook P.E., Phuc H.K. et al. Immune activation by life-shortening *Wolbachia* and reduced filarial competence in mosquitoes // Science. 2009. V.326. P.134—136. doi:10.1126/science.1177531.
12. Moreira L.A., Iturbe-Ormaetxe I., Jeffery J.A. et al. *Wolbachia* symbiont in *Aedes aegypti* limits infection with dengue, Chikungunya, and *Plasmodium* // Cell. 2009. V.139. P.1268—1278. doi:10.1016/j.cell.2009.11.042.
13. Hedges L.M., Brounlie J.C., O'Neill S.L. et al. *Wolbachia* and virus protection in insects // Science. 2008. V.322. P.702. doi:10.1126/science.1162418.
14. Walker T., Johnson P.H., Moreira L.A. et al. The *wMel Wolbachia* strain blocks dengue and invades caged *Aedes aegypti* populations // Nature. 2011. V.476. P.450—453. doi:10.1038/nature10355.
15. Albertson R., Casper-Lindley C., Cao J. et al. Symmetric and asymmetric mitotic segregation patterns influence *Wolbachia* distribution in host somatic tissue // J. Cell Sci. 2009. V.122. P.4570—4583. doi:10.1242/jcs.054981.
16. Moreira L.A., Ye Y.H., Turner K. et al. The *wMelPop* strain of *Wolbachia* interferes with dopamine levels in *Aedes aegypti* // Parasit. Vectors. 2011. V.4. P.28. doi:10.1186/1756-3305-4-28.
17. Miller W.J., Ebrman L., Schneider D. Infectious speciation revisited: impact of symbiont-depletion on female fitness and mating behavior of *Drosophila paulistorum* // PLoS Pathog. 2010. V.6. e1001214. doi:10.1371/journal.ppat.1001214.
18. Berdoy M., Webster J.P., Macdonald D.W. Fatal attraction in rats infected with *Toxoplasma gondii* // Proc. Biol. Sci. 2000. V.267. P.1591—1594. doi:10.1098/rspb.2000.1182.
19. Cryan J.F., Dinan T.G. Mind-altering microorganisms: the impact of the gut microbiota on brain and behavior // Nat. Rev. Neurosci. 2012. V.13. P.701—712. doi:10.1038/nrn3346.
20. Heijtz R.D., Wang S., Anuar F. et al. Normal gut microbiota modulates brain development and behavior // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2011. V.108. P.3047—3052. doi:10.1073/pnas.1010529108.
21. Sharon G., Segal D., Ringo J.M. et al. Commensal bacteria play a role in mating preference of *Drosophila melanogaster* // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V.107. P.20051—20056. doi:10.1073/pnas.1009906107.
22. Yun J.H., Rob S.W., Whon T.W. et al. Insect gut bacterial diversity determined by environmental habitat, diet, developmental stage, and phylogeny of host // Appl. Environ. Microbiol. 2014. V.80. P.5254—5264. doi:10.1128/AEM.01226-14.
23. Rosenberg E., Koren O., Reshef L. et al. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution // Nat. Rev. Microbiol. 2007. V.5. P.355—362. doi:10.1038/nrmicro1635.

# Метилирование ДНК и поведение

Ю.Э.Гербек, С.Р.Хантемирова

Любой признак формируется на основе генотипа, а также под действием среды, влияние которой иногда преобладает (особенно это касается поведения). Долгое время считали, что личность и характер человека формирует только окружающая среда (события жизни, воспитание). Затем, с развитием генетики, популярность приобрела противоположная точка зрения, т.е. ответственность за формирование личности легла на плечи наследственности. Впрочем, относительно поведения человека эту точку зрения воспринимали с большим трудом. Тем не менее масса примеров, связанных с психологическими травмами родителей и различными воздействиями в ранний период развития, говорит о том, что работа генома может быть как-то скорректирована под влиянием внешних условий.

С развитием эпигенетики появилась возможность найти объяснение связи между наследственностью и средой. Выяснилось, что разнообразие живых организмов и тканей во многом зависит от эпигенетических механизмов, влияющих также и на работу центральной нервной системы и поведение. Конечно, от экспрессии гена до формирования признака существует довольно много ступеней модификации, например, синтез кодируемого геном белка, его доставка и активность могут быть



**Юрий Эмильевич Гербек**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории эволюционной генетики Института цитологии и генетики СО РАН (ИЦиГ СО РАН). Область научных интересов — доместикация животных, микроэволюция, генетика поведения, эпигенетика.



**София Рашитовна Хантемирова**, студентка 5-го курса Новосибирского государственного университета, проходит преддипломную практику в лаборатории эволюционной генетики ИЦиГ СО РАН. Занимается изучением экспрессии генов ДНК-метилтрансфераз крыс и лисиц, селекционируемых по поведению.

подавлены. Однако во многих случаях именно регуляция экспрессии гена служит решающим фактором для проявления признака.

Сегодня известны различные механизмы регуляции генной экспрессии, но мы остановимся на одном из них — на метилировании ДНК (присоединении метильной группы к некоторым цитозинам). Такая химическая модификация ДНК, возникнув на ранних этапах развития под действием внешних и внутренних факторов, может сохраняться в течение всей жизни организма, а иногда и передаваться от родителей детям [1–3]. Этим, в частности, объясняются те отсроченные эффекты детских психологических травм, которые проявляются в течение жизни.

Метилирование ДНК, которое встречается у многих организмов, не изменяет структуру кодируемого белка, но может влиять на экспрессию генов. У млекопитающих метильные группы присоединяются в основном к цитозинам, находящимися в паре с гуанином (СрG-динуклеотиды). Во многих случаях транскрипция ДНК зависит от количества метильных групп на данном участке: если их много, она неактивна, но становится активной с их уменьшением.

Особенно активно метилирование ДНК происходит в эмбриональный период и вскоре после рождения. Именно в это время обнаружено самое большое количество ДНК-метилтрансфераз (DNMT) — ферментов, осуществляющих этот процесс. Если работа одного (или нескольких) их генов полностью нарушена, организм погибает, не родившись, или в первые недели жизни [4]. После рождения количество ДНК-метилтрансфераз постепенно уменьшается, однако в нейронах этих ферментов остается достаточно много, что, видимо, указывает на их важную роль в нервной системе [5].



Материнское поведение крысы.

Фото Р.В.Кожемякиной

### Материнское поведение и метилирование ДНК

Один из наиболее интересных и хорошо изученных примеров влияния метилирования ДНК на поведение связан с материнской заботой у крыс. Группа канадских исследователей под руководством М.Мини изучила отсроченные эффекты материнской заботы, проявляющиеся у взрослых животных [6]. Из лабораторной популяции крыс отобрали две группы с крайней формой поведения. Животные из первой группы активно ухаживали

за своими детенышами (вылизывали их, чистили им шерсть), тогда как во второй группе забота о потомстве проявлялась значительно меньше (крысы были тревожнее и в большей степени поддавались стрессу). Эти особенности поведения устойчиво сохранялись у потомства в каждой группе. Так, крысят, рожденных заботливыми матерями, вскармливали крысы из группы с низким уровнем материнского поведения и наоборот (рис.1,а).

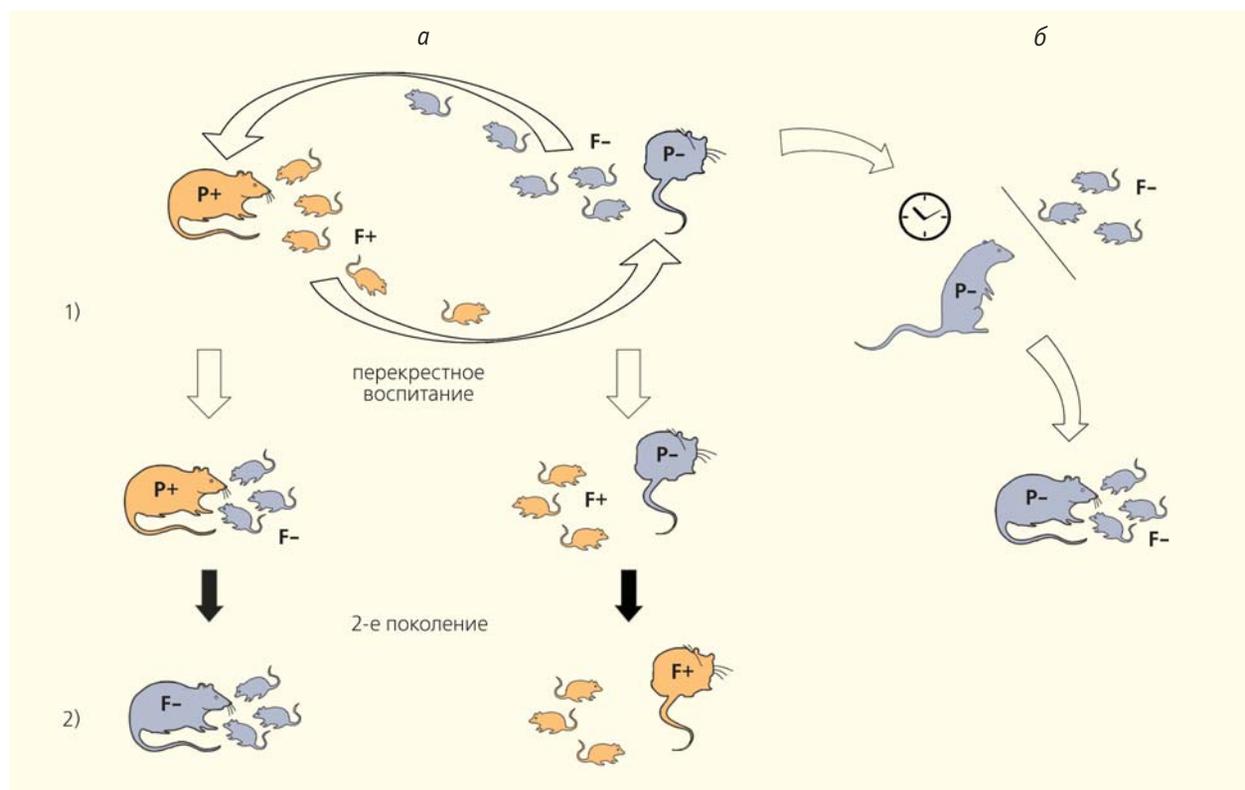


Рис.1. Схема экспериментов по изменению материнского поведения крыс. Перекрестное воспитание (а): 1 — крысы с низким уровнем материнского поведения (P-) вскармливает потомство крыс с высоким материнским поведением (P+), и наоборот. 2 — материнское поведение потомства (F-) соответствует поведению выкармливавших его крыс F+; (б) отсаживание матери от детенышей в их первые недели жизни усиливает материнскую заботу [6].

Интересно, что выросшие крысы обладали всеми особенностями поведения вскармливающих их крыс, а не биологических матерей. Эти черты передавались в ряду поколений по материнской линии. Забота о крысятах усиливалась, если в течение первых недель жизни их ненадолго отсаживали от матерей, которые после возвращения детенышей в клетку начинали их активно вылизывать (рис.1,б).

Реакция на стресс оценивается по количеству его гормонов, глюкокортикоидов, выброс которых в кровь регулируют рецепторы, находящиеся в разных отделах мозга, в первую очередь в гиппокампе. Они через цепочку взаимодействий останавливают выброс гормона. Глюкокортикоидные рецепторы кодируются одним геном, *Nr3c1*. Соответственно, если рецепторов в гиппокампе много, стресс купируется быстро, а если мало, его последствия будут более продолжительны. У крыс с низким уровнем материнской заботы рецепторов в гиппокампе оказалось меньше, чем у животных с противоположным поведением. Это связано с пониженной активностью гена *Nr3c1*. Она вызвана метилированием его регуляторного участка, происходящего на фоне повышенного количества ДНК-метилтрансферазы DNMT1 (рис.2). У крысят этот участок ДНК метилируется в первый же день после рождения. Однако если мать часто вылизывает детенышей и чистит им шерсть, то в течение нескольких дней их жизни ключевой CpG-динуклеотид регуляторного района теряет метильную группу (деметируется), в то время как другие остаются метилированы.

Такой механизм отсроченных эффектов ранних воздействий, видимо, имеет место и у человека. Об этом говорят работы, проведенные теми же исследователями под руководством М.Мини на двух группах самоубийц (участники первой группы росли в неблагоприятной среде, о второй группе таких данных нет). Контролем служили люди, погибшие в несчастных случаях. У самоубийц первой группы глюкокортикоидных рецепторов в гиппокампе оказалось меньше, а его ген был метилирован сильнее по сравнению с другой группой и контролем [7]. Схожесть описанных изменений у крысы и у человека дала основание предположить, что в метилировании гена *Nr3c1* в гиппокампе и заключается

ключевой механизм ранних воздействий. Но обусловлен ли описанный феномен только эпигенетически и не связан ли он с генотипом исследованных людей и животных?

### Метилирование гена рецептора глюкокортикоидов у диких крыс

Считается, что влияние раннего опыта на становление стресс-ответа и развитие центральной нервной системы у лабораторных крыс отражает пластичность этих систем у диких животных, т.е. возможность адаптации к различным условиям среды. В дикой популяции крыс существует социальная иерархия, из-за которой особи обитают в различной по комфортности и богатству ресурсами среде, поэтому самкам требуется разное время для добывания пищи. Если расстояние до источника пищи и воды небольшое, самка часто покидает гнездо и быстро возвращается, время контактов с детенышами увеличивается — приходя назад, она каждый раз вылизывает крысят и чистит им шерсть. Как и в случае с отсаживанием крысят от матери или при выраженной материн-

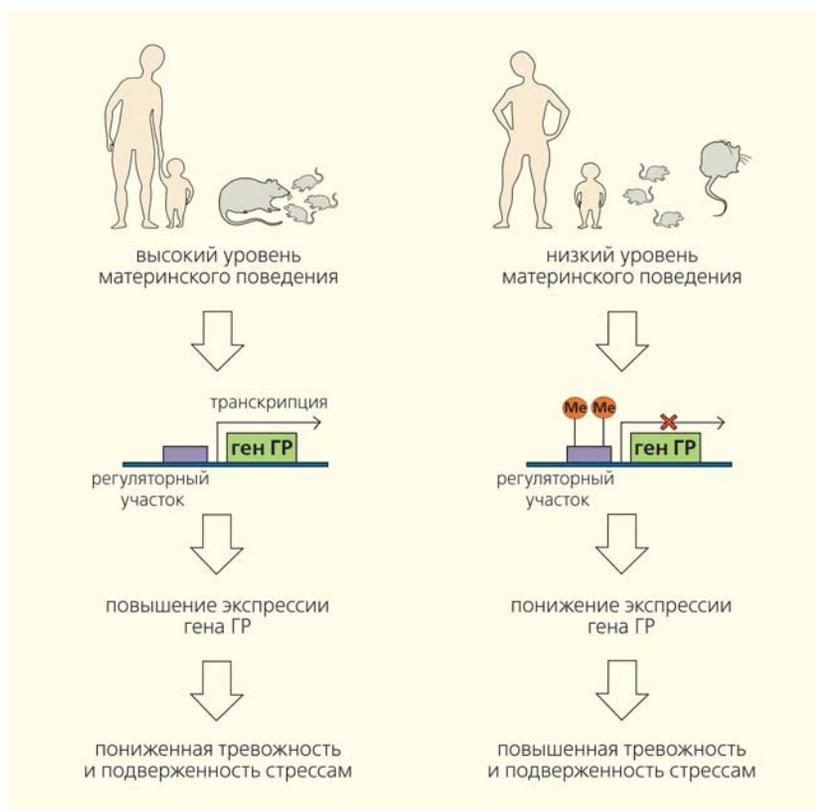


Рис.2. Механизмы отсроченных эффектов материнского поведения. У особей, воспитанных при недостатке материнской заботы, регуляторный участок гена глюкокортикоидного гормона (*Nr3c1*) метилирован (Me), его экспрессия понижена, что приводит к повышенной тревожности и подверженности стрессам во взрослом состоянии [6, 7].

ской заботе, выросшие потомки должны быть меньше подвержены стрессу. Если же пища далеко, то самка редко и надолго (иногда на 2–3 часа) покидает гнездо, оставляя крысят без внимания. Повышенный ответ на стресс более адаптивен для мест на краю ареала, где мало еды и много хищников [8]. Согласно описанному механизму, у таких крыс в регуляторных участках гена *Nr3c1* должно быть больше метильных групп, а кратковременное отсаживание крысят в начале жизни от матери должно понизить их количество и увеличить число рецепторов в гиппокампе.

В нашем эксперименте у отловленных из природы крыс регуляторный участок гена глюкокортикоидного рецептора был метилирован очень слабо или вообще неметилирован, даже в тех CpG-динуклеотидах, которые, по данным группы Мини, должны быть метилированы всегда [9]. Состояние гена *Nr3c1* в гиппокампе мы проанализировали также на двух других группах крыс — ручных и агрессивных. Их отловили из природы в 1970 г. и провели отбор на ручное и агрессивное поведение по отношению к человеку. Ручные крысы были менее подвержены стрессу и менее тревожны, чем агрессивные, и у них было больше рецепторов в гиппокампе. В различиях между собой они были во многом схожи с крысами Мини, что позволяло предположить один и тот же механизм. Однако у ручных и агрессивных крыс, так же как и у диких, в регуляторном участке гена *Nr3c1* почти не было метильных групп.

Потомков этих диких крыс второго поколения в первые дни после рождения отсаживали от матери, что должно было изменить количество рецепторов в гиппокампе и снизить метилирование его гена. Когда крысята выросли, у них экспрессия гена *Nr3c1* в гиппокампе действительно была повышена. Однако и у экспериментальных, и у контрольных животных, которых не отсаживали от матери, метилирование гена практически отсутствовало, как и у их диких предков. Значит, повышенную экспрессию гена *Nr3c1* у диких крыс определяет какой-то другой механизм.

Почему же хорошо изученный на лабораторных крысах феномен оказался неприменим к диким животным и их потомкам? По мнению ряда исследователей, отсроченные эффекты ранних воздействий связаны не

только с повышением материнской заботы, но и с действием на самих крысят [10]. Животные, отобранные канадскими исследователями, видимо, имели повышенную восприимчивость к контактам с матерью, по сравнению с общей популяцией лабораторных крыс из вивария и с дикими крысами, изучаемыми нами (рис.3). Вероятно, эти грызуны (и с повышенным, и с пониженным уровнем материнской заботы) обладают одним и тем же генотипом, позволяющим метилировать/деметилировать ген *Nr3c1*, а у диких крыс этот процесс, видимо, не играет существенной роли в регуляции ответа на стресс.

Если описанный механизм касается крыс определенной группы, то как объяснить, что похожий эффект ранних воздействий наблюдается у людей? Мы полагаем, что у них он тоже связан с генотипом. Далеко не все люди, выросшие в социально неблагополучных семьях и испытывавшие грубое обращение, кончают с собой. Однако только дошедшие до самоубийства могли попасть в выборку исследователей, поскольку невозможно анализировать уровень метилирования ДНК и количество глюкокортикоидных рецепторов в мозге живых людей. Они (как и в слу-

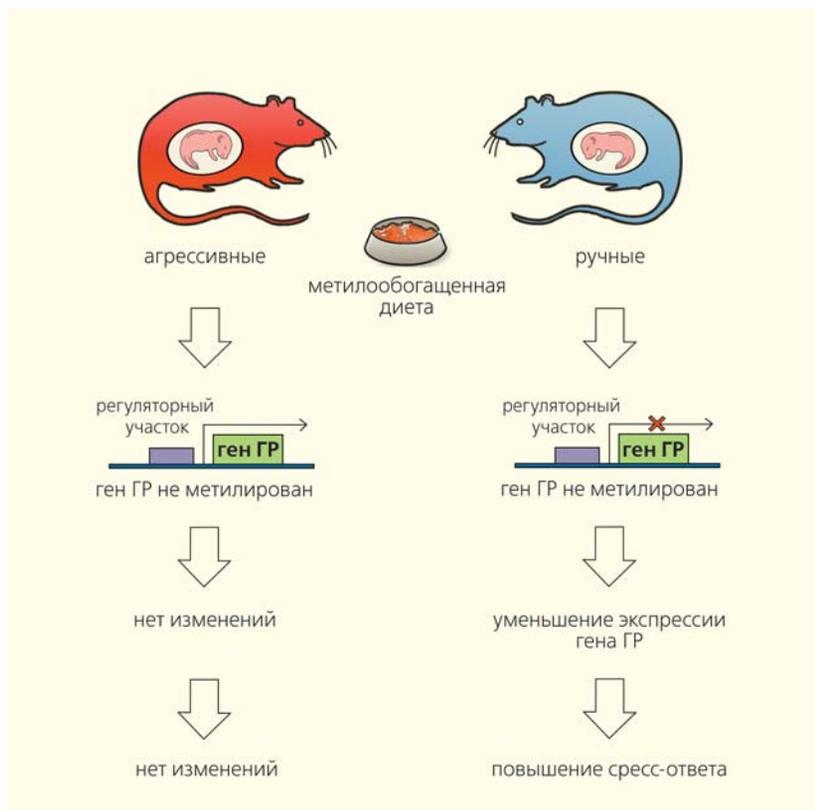


Рис.3. Влияние метилообогащенной диеты у беременных крыс на поведение их потомков. Диета матерей уменьшила экспрессию гена *Nr3c1* и повысила реакцию на стресс у потомков крыс, отбираемых на «ручное» поведение многие годы. Эффекта от метиловых добавок у агрессивных крыс не выявлено. В обеих группах регуляторный участок гена *Nr3c1* не метилирован [9, 20].

чае с крысами, рис.3) могут быть носителями определенного генотипа, при котором воздействия в раннем возрасте воспринимаются сильнее и имеют большие последствия из-за метилирования гена глюкокортикоидного рецептора. Однако у крыс и у человека были обнаружены и другие гены, чья экспрессия и метилирование меняются при ранних воздействиях, связанных с метилированием ДНК [11].

### Хроническая агрессия и метилирование ДНК

Установленный в первые два года жизни профиль метилирования ДНК, видимо, может играть существенную роль в формировании агрессивного поведения [12]. Известно, что у детей оно сильнее всего проявляется в 2—4 года. Тогда происходит наибольшее количество драк, постепенно снижающихся между пятью и 15 годами. Но у некоторых детей (4—7%) высокая агрессия сохраняется до полового созревания. Часто такие подростки происходят из неблагополучных семей, и их собственные семьи также оказываются неблагополучными: вырастая, они зачастую становятся наркоманами, алкоголиками, попадают в тюрьмы, у них много физических, умственных и социальных проблем. Однако связано это не только со средой, в которой дети растут, но в большой степени и с генетическим фактором. Генотип и среда, как, вероятно, и в случае с самоубийцами, влияют друг на друга через метилирование ДНК. Разработанная для неблагополучных семей система мер снижает риск возникновения хронической агрессии.

Совсем недавно изменения в метилировании ряда генов были найдены у взрослых людей, отличавшихся в подростковом возрасте хронической агрессией [13]. Среди них выявили группу, в которой формирование агрессивного и других форм поведения связано с работой нейромедиаторов. Эти результаты — только первый шаг в данном исследовании, недостатки которого отмечают и сами авторы. Главный из них состоит в том, что изучались образцы крови, а метилирование ДНК во многом тканеспецифично, поэтому экстраполировать полученные данные на мозг можно лишь с большими оговорками. Тем не менее исследования на животных показывают, что метилирование ряда генов в мозге действительно коррелирует с их метилированием в крови. Второй не менее важный недостаток — обнаруженные различия небольшие (хотя и достоверные), которые могут указывать как на их несущественное значение, так и возможность существования в изученных клетках небольшой группы с высокими различиями. В этом случае именно она может играть решающую роль в наблюдаемом феномене.

### «Ты есть то, что ты ешь»

Условия, в которых протекает эмбриогенез, оказывают на дальнейшую жизнь не меньшее влияние, чем события, происходящие вскоре после рождения. Всем хорошо известны рекомендации врачей беременным женщинам: не нервничать, не пить, не курить. Особенно важен для формирования ЦНС и гормональной системы ответ на стресс третий триместр беременности [14]. Но и в первые недели после зачатия материнский стресс также опасен: например, он повышает риск возникновения шизофрении [15]. В отсроченных эффектах воздействий во время эмбрионального развития метилирование ДНК тоже играет важную роль. Материнские гормоны (глюкокортикоиды), проходя через фетоплацентарный барьер, теряют свою активность под действием фермента 11-бета-гидроксистероиддегидрогеназы II типа (11 $\beta$ HSD2). Однако при стрессе количество глюкокортикоидов повышается, а экспрессия гена *11 $\beta$ HSD2* падает, активные глюкокортикоиды проходят через фетоплацентарный барьер и влияют на формирование плода. Вероятно, наблюдаемый эффект связан с усиленным метилированием гена этого фермента [16], хотя и не таким значительным, как с геном *Nr3c1*, да и доказательств тому гораздо меньше. У беременных крыс стресс сопровождается повышением ДНК-метилтрансфераз (в плаценте *Dnmt3a*, а в коре мозга у плода — *Dnmt1*). Как у человека, так и у животных пренатальный стресс может привести к рождению плода с низким весом, повышенному риску сердечно-сосудистых заболеваний, высокой тревожности и усиленному стрессу.

Глюкокортикоиды, проникая в мозг плода, вызывают множественный эффект. С одной стороны, они снижают количество своих рецепторов в гиппокампе (у взрослых повышают продолжительность действия стресса), с другой — изменяют уровень метилирования ряда генов. К такому относятся гены кортикотропин-релизинг гормона (важный участник ответа на стресс) и дофаминового рецептора *Drd2*. От активности этих генов, играющих важную роль в регуляции стресс-ответа и поведения, во многом зависят и отсроченные эффекты воздействий во время беременности [17].

Кроме стресса на метилирование ДНК влияет и то, что мы потребляем. Это, конечно, алкоголь, о воздействии которого на метилирование ДНК эмбриона написано множество статей. Однако очень важно и наличие в пищевом рационе незаменимой аминокислоты метионина (предшественника донора метильной группы), а также компонентов цепи его метаболизма — холина, бетаина, фолиевой кислоты, витамина B<sub>12</sub> и цинка. На животных с помощью такой обогащенной диеты во время беременности можно изучить влияние метилирования на различные признаки и экс-

прессию генов у потомства. Все эти вещества в период эмбрионального развития способны влиять на формирование многих систем организма, а также вызывать различные болезни — от онкологических и сердечных до психических [18].

Известен эксперимент, в котором беременные мышей содержали на диете с повышенным количеством холина, при этом у их потомков улучшалась долговременная пространственная память [18]. Холин, помимо участия в метаболизме метионина, выполняет и другие важные функции: он служит предшественником компонентов клеточных мембран многих типов клеток, в том числе нейронов и нейромедиатора ацетилхолина, влияющего на обучаемость и память. Учитывая столь важную роль холина в развитии и нехватку его в организме, в 1998 г. была предложена рекомендация для его использования во всех возрастных группах, но особенно при беременности [19]. Согласно экспериментам, холиновая диета может положительно влиять на формирование нервной системы, но самым важным, видимо, остается накопление донора метильной группы [18].

Зная о влиянии диеты, обогащенной донорами метильных групп, на метилирование ДНК, мы содержали беременных крыс разного генотипа (агрессивных и ручных) на такой диете, рассчитывая повлиять на метилирование гена рецептора глюкокортикоидов *Nr3c1* (рис.2). В группе Мини экспрессию этого гена изменяли прямым введением метионина в мозг. Поскольку различия в поведении и физиологических признаках у наших крыс не связаны с материнским поведением, мы полагали, что они закладываются на более ранних этапах (тогда еще не было данных о том, что метилирование гена глюкокортикоидного гормона у ручных и агрессивных крыс практически сведено к нулю).

Согласно нашим результатам, уровень глюкокортикоидного ответа на стресс и его продолжительность (т.е. показатели, которые считаются очень важными в отборе на ручное и агрессивное поведение) повысились у взрослых потомков ручных матерей почти до уровня агрессивных. На диету отреагировал и ген *Nr3c1* в гиппокампе: его активность упала до уровня агрессивных крыс [20]. В то же время на агрессивных животных диета почти не повлияла. Поскольку у ручных крыс метионина в крови в два раза меньше, чем у агрессивных [21], диета восполняла его недостаток. Вероятно, это позволило во время эмбрионального развития повысить метилирование каких-то генов, в том числе и усиливающих активность глюкокортикоидных рецепторов. Однако изменений общего уровня метилирования ДНК у взрослых животных не обнаружили. Впрочем, при гомоцистонурии, болезни, при которой нарушен гомеостаз метионина, иногда в одних тканях можно найти эти разли-

чия, а в других — нет [22]. Само метилирование ДНК во многом ткане- и геноспецифично. Мы не обнаружили и особых изменений в поведении и у ручных, и у агрессивных крыс. Если бы животные содержались на метилобогатой диете до конца эксперимента (как пациенты с недостатком какого-либо вещества в организме), а не только во время эмбриогенеза, возможно, изменения были бы ярче.

Таким образом, наши эксперименты продемонстрировали взаимодействие факторов среды (введение метионина, видимо, связанное с эпигенетическими эффектами), с генотипом крыс (и ручных, и агрессивных). На то же указывает и другая исследуемая нами модель — лисицы, отобранные, как и крысы, на ручное или на агрессивное поведение. Мы выявили различия в экспрессии ДНК-метилтрансфераз и ряда других генов, связанных с метаболизмом метионина, у животных разного поведения и генотипа.

### Обогащенная среда в детском и раннем подростковом возрасте

Мы видим, насколько важны условия среды в раннем возрасте для формирования поведения. Часто обозначают несколько чувствительных периодов, когда внешняя среда оказывает значительное влияние на развитие организма. Обычно это третий триместр беременности и ранний постнатальный период, к которым в последнее время добавили начало беременности, а в особенности пред- и раннее подростковое время. В этот период исправить пагубные эффекты более ранних воздействий могут благоприятные условия: обогащенная среда, в которой содержатся лабораторных животных, увеличенные размеры клеток, большее число животных в одной клетке, игрушки различных форм и цветов, расширенные возможности для физической активности. Все это усиливает сенсорные, когнитивные, моторные и визуальные стимулы, усложняет социальное поведение [23]. У животных, выросших в такой среде, с одной стороны, улучшаются обучаемость и память, корректируются дефекты развития, а с другой — позднее проявляются симптомы различных генетически обусловленных заболеваний ЦНС, схожих с болезнями Хантингтона, Альцгеймера, Паркинсона, с эпилепсией и др.

После двух недель содержания в обогащенной среде подопытные мыши, имеющие генетически обусловленный дефект памяти, приблизилась по способности к запоминанию к здоровым мышам [23]. Подобный же эффект вызывал ингибитор деацетилаз, повышающий ацетилирование гистонов определенных участков ДНК и активирующий их транскрипцию. Такое состояние ДНК и гистонов, как уже говорилось, часто связано с ее пониженным метилированием. Улучшение памяти

в обогащенной среде отмечалось не только у экспериментальных животных, но и у их потомков первого поколения по материнской линии.

Появление эпигенетических меток в геноме зависит как от внешних условий, так и от генотипа. Это могут быть мутации, меняющие цитозин на другой нуклеотид в CpG-динуклеотидах или изменяющие уровень метионина. Однако есть

небольшое количество экспериментов, в которых показана способность эпигенетических меток передаваться по наследству без опоры на генотип или материнскую среду [1–3]. Стремительное развитие генетики и появление множества новых данных открывают все новые грани эпигенетических механизмов, регулирующие активность генома. ■

## Литература

1. *Jaenisch R., Bird A.* Epigenetic regulation of gene expression: how the genome integrates intrinsic and environmental signals // *Nat. Genet.* 2003. V.33. P.245–254.
2. *Skinner M.K., Anway M.D., Savenkova M.I. et al.* Transgenerational epigenetic programming of the brain transcriptome and anxiety behavior // *PLoS One.* 2008. V.3. e3745.
3. *Dias B.G., Ressler K.J.* Parental olfactory experience influences behavior and neural structure in subsequent generations // *Nat. Neurosci.* 2014. V.17. P.89–96.
4. *Morgan H.D., Santos F., Green K. et al.* Epigenetic reprogramming in mammals // *Hum. Mol. Genet.* 2005. V.14. R.47–58.
5. *Feng J., Chang H., Li E., Fan G.* Dynamic expression of de novo DNA methyltransferases Dnmt3a and Dnmt3b in the central nervous system // *J. Neurosci. Res.* 2005. V.79. P.734–746.
6. *Weaver I.C., Cervoni N., Champagne F.A. et al.* Epigenetic programming by maternal behavior // *Nat. Neurosci.* 2004. P.847–854.
7. *McGowan P.O., Sasaki A., D'Alessio A.C. et al.* Epigenetic regulation of the glucocorticoid receptor in human brain associates with childhood abuse // *Nat. Neurosci.* 2009. V.12. P.342–348.
8. *Meaney M.J., Diorio J., Francis D. et al.* Early environmental regulation of forebrain glucocorticoid receptor gene expression: implications for adrenocortical responses to stress // *Dev. Neurosci.* 1996. V.18. P.49–72.
9. *Herbeck Y.E., Gulevich R.G., Amelkina O.A. et al.* Conserved methylation of the glucocorticoid receptor gene exon 1–7 promoter in rats subjected to a maternal methyl-supplemented diet // *Int. J. Dev. Neurosci.* 2010. V.28. P.9–12.
10. *Macri S., Mason G.J., Wurbel H.* Dissociation in the effects of neonatal maternal separations on maternal care and the offspring's HPA and fear responses in rats // *Eur. J. Neurosci.* 2004. V.20. P.1017–1024.
11. *McGowan P.O., Suderman M., Sasaki A. et al.* Broad epigenetic signature of maternal care in the brain of adult rats // *PLoS One.* 2011. V.6. e14739.
12. *Tremblay R.E., Szyf M.* Developmental origins of chronic physical aggression and epigenetics // *Epigenomics.* 2010. V.2. P.495–499.
13. *Provençal N., Suderman M.J. et al.* Association of childhood chronic physical aggression with a DNA methylation signature in adult human T cells // *PLoS One.* 2014. V.9. e89839.
14. *Vallée M., Mayo W., Dellu F. et al.* Prenatal stress induces high anxiety and postnatal handling induces low anxiety in adult offspring: correlation with stress-induced corticosterone secretion // *J. Neurosci.* 1997. V.17. P.2626–2636.
15. *Khashan A.S., Abel K.M., McNamee R. et al.* Higher risk of offspring schizophrenia following antenatal maternal exposure to severe adverse life events // *Arch. Gen. Psychiatry.* 2008. V.65. P.146–152.
16. *Jensen Peña C., Monk C., Champagne F.A.* Epigenetic effects of prenatal stress on 11 $\beta$ -hydroxysteroid dehydrogenase-2 in the placenta and fetal brain // *PLoS One.* 2012. V.7. e39791.
17. *Rodrigues A.J., Leão P., Pêgo J.M. et al.* Mechanisms of initiation and reversal of drug-seeking behavior induced by prenatal exposure to glucocorticoids // *Mol. psychiatry.* 2011. V.17. P.1295–1305.
18. *Van den Veyver I.B.* Genetic effects of methylation diets // *Annu Rev Nutr.* 2002. V.22. P.255–282.
19. *Blusztajn J.K.* Choline, a vital amine // *Science.* 1998. V.281. P.794–795.
20. *Гербек Ю.Э., Оськина И.Н., Гулевич Р.Г., Плюснина И.З.* Влияние материнской метилобогащенной диеты на экспрессию гена рецептора глюкокортикоидов в гиппокампе у крыс, селективируемых по поведению // *Цитол. генет.* 2010. Т.44. №2. С.108–113.
21. *Albert F.W., Shchepina O., Winter C. et al.* Phenotypic differences in behavior, physiology and neurochemistry between rats selected for tameness and for defensive aggression towards humans // *Horm. Behav.* 2008. V.53. P.413–421.
22. *Jadavji N.M., Deng L., Leclerc D. et al.* Severe methylenetetrahydrofolate reductase deficiency in mice results in behavioral anomalies with morphological and biochemical changes in hippocampus // *Mol. Genet. Metab.* 2012. V.106. P.149–159.
23. *Arai J.A., Feig L.A.* Long-lasting and transgenerational effects of an environmental enrichment on memory formation // *Brain Res. Bull.* 2011. V.85. №1–2. P.30–35.

# Как общаются амфибии

Е.Н.Панов

Исучая коммуникативное поведение животных, некоторые ученые склонны придавать особое значение акустическим сигналам, и зачастую при этом игнорируют другие каналы связи — зрительный, запаховой и тактильный. Тому, на мой взгляд, есть несколько причин. Первая из них — ложная аналогия между звуковой сигнализацией животных и речью людей, возникшая на основе наивного заблуждения, что звуки, издаваемые братьями нашими меньшими, непременно «означают» нечто конкретное. Именно на этой почве в середине прошлого века родилось дезориентирующее словосочетание «язык животных». Так, в частности, озаглавлена книжка («Animal language») за авторством знаменитого эволюциониста Д.Хаксли (J.Huxley) и его менее известного коллеги Л.Коха (L.Koch), вышедшая в свет в 1964 г. (на русский язык переведена в 1968 г.). Авторы мимоходом упоминают о том, что в общении животных важны самые разные сигнальные средства (например, специфические позы в брачном поведении птиц), но вся книга посвящена именно звуковой сигнализации, приравненной, таким образом, к «языку животных».

Вторая причина приоритета, отдаваемого этологами рассмотрению акустического поведения в ущерб всем прочим способам оповещения индивида о своем присутствии и о «своих намерениях», объясняется большей



**Евгений Николаевич Панов**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории сравнительной этологии и биокommunikации Института проблем эволюции и экологии им. А.Н.Северцова РАН. Лауреат Государственной премии Российской Федерации «За фундаментальные исследования в области коммуникации и биосоциальности животных» (1993). Специалист в области эволюции поведения животных.

простотой получения первичных данных о звуковом оснащении животных. Показательно в этом смысле название первой главы книги Хаксли и Коха: «С микрофоном по зоопарку». С появлением портативных звукозаписывающих устройств в первой половине XX в., а также совершенных анализаторов звука, многие воспользовались отпавшей необходимостью изучать поведение животных, часами напряженно глядя в бинокль и фиксируя в блокноте тонкие детали происходящего. Гораздо проще стало выставить на территории самца того или иного вида птиц магнитофон и записать столько его песен, сколько требуют каноны статистической репрезентативности первичных данных. Далее можно было спокойно обрабатывать эти записи количественно в комфортной обстановке биоакустической лаборатории.

Все сказанное привело к формированию у некоторой части научного сообщества идеи, согласно которой именно в вокализации позвоночных вообще и млекопитающих в частности следует искать предтечу речи людей. Эта точка зрения наиболее последовательно проводится в недавней книге У.Фитча «Эволюция языка», где автор ратует за развитие новой, на его взгляд, области знаний, именуемой им биолингвистикой. Весь раздел книги, посвященный коммуникации животных, явным образом сводится к вопросу об использовании ими акустического канала связи. Из этого текста читатель может вынести ошибочное представление, что эта модалность лежит в основе главного и универсального инструмента обмена жизненно важной информацией между особями, по крайней мере у позвоночных.

Однако при более широком взгляде на происходящее выясняется, что это не так. Оказывается, существуют целые весьма обширные подразделения животных, где акустическая сигнализация либо отсутствует полностью, либо обнаруживается в виде исклю-

чения у немногих отдельных видов. Насколько известно сегодня, она нехарактерна в целом для огромного класса рыб, включающего более 20 тыс. видов. Не используется она и представителями отряда хвостатых амфибий, к которым относятся около 430 видов. В этом отношении они резко отличаются от своих близких родичей – бесхвостых земноводных, у которых акустическое поведение почти всегда хорошо развито. Наконец, «немые» оказываются почти все рептилии (около 6 тыс.), которые по видовому разнообразию превосходят млекопитающих (примерно 4.5 тыс. видов) и лишь немногим уступают птицам (8.6 тыс. видов). Все это говорит о том, что жизненное благополучие в животном мире может прекрасно поддерживаться при полном отсутствии возможностей использования акустической сигнализации.

Далее речь пойдет о том, что известно сегодня о разнообразии процессов обмена акустической информацией в одном из крупных подразделений животного мира — у бесхвостых амфибий\*.

### Первопроходцы в освоении наземного образа жизни

Около 370 млн лет назад, в девонском периоде, начался процесс освоения суши позвоночными. Это стало возможным благодаря тому, что некоторые первоначально водные формы смогли постепенно перейти от жаберного дыхания к легочному. Становление этого нового способа потребления кислорода и использования его в качестве ресурса, без которого существование на суше невыносимо, произошло в результате формирования у видов-первопроходцев принципиально новой системы органов. Ее главным компонентом стали легкие — полые резервуары, которые через эластичную трубку-трахею могли свободно обмениваться газовым содержимым с массами воздуха во внешней среде.

Именно такие структуры стали в дальнейшем основой для формирования голосовых аппаратов у всех тех ныне живущих наземных позвоночных, которым в той или иной мере оказалось свойственно акустическое поведение. Эта черта ныне присуща подавляющему большинству представителей всего лишь трех крупных подразделений позвоночных. Это бесхвостые амфибии, птицы и млекопитающие.

Среди ныне живущих позвоночных кандидатом на роль ближайшего прямого предка амфибий до последнего времени считали кистеперых

рыб. По идее, их лопастевидные плавники могли постепенно преобразоваться в конечности, обеспечивающие передвижение по твердому субстрату (ноги амфибий, рептилий и млекопитающих, относимых вместе с птицами к животным «четвероногим», по-научному — к тетраподам).

Такой общепринятой точке зрения противоречил, казалось бы, один очень важный факт. Дело в том, что из всех ныне живущих рыб дыхание кислородом воздуха свойственно другой, родственной кистеперым, группе — двоякодышащим рыбам. Обитают они в пресноводных водоемах и способны существовать в обедненной кислородом воде. Они могут даже переживать в состоянии анабиоза периоды временного высыхания этих акваторий.

Помимо жабр, двоякодышащие располагают своеобразными органами легочного дыхания — одним либо двумя пузырями, которые открываются в пищевод на его нижней стороне. Двоякодышащие известны палеонтологам с девонского периода (около 400 млн лет назад). Именно в то время, как полагают, некая предковая группа рыб разделилась на две ветви — двоякодышащих и кистеперых. Обе процветали на протяжении последующих примерно 150 млн лет, до начала триасового периода. Изучены ископаемые останки представителей 11–12 семейств двоякодышащих, из которых дожили до наших дней лишь два семейства с шестью видами. Один из них — обитающий в Австралии рогозуб, или баррамунда (*Neoceratodus forsteri*), — обладает одним легким, у пяти других их по два. Та же судьба угасания постигла и весьма многочисленных некогда кистеперых, с той разницей, что из них до нашего времени смогли дожить всего лишь два вида латимерий.

Предположение о том, что именно кистеперые, а не двоякодышащие были непосредственными предками амфибий, основывалось на ряде соображений сравнительно-анатомического характера, в частности на особенностях строения их черепа. Считали, что амфибии произошли от древних, ныне вымерших кистеперых рыб, таких в частности, как относящиеся к родам *Eusthenopteron* и *Sauripterus*. Однако молекулярно-генетическое исследование, проведенное совсем недавно обширным международным коллективом ученых, позволило выдвинуть гипотезу, альтернативную этой устоявшейся точке зрения. Исследователи пришли к выводу, что двоякодышащие исторически моложе кистеперых и, таким образом, стоят ближе к той эволюционной ветви, которая дала начало всем наземным позвоночным, и амфибиям в том числе [1].

Современные амфибии подразделяются на три отряда. Наименее многочисленный из них по числу выживших форм — это амфибии безногие (около 190 видов), которые, как следует уже из их названия, внешне напоминают змей. Другой отряд —

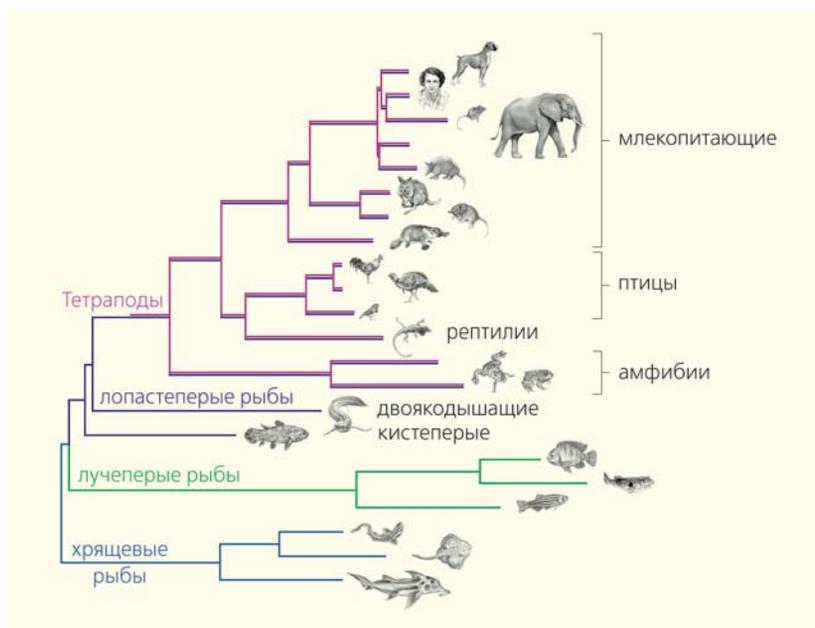
\* О коммуникативном поведении других животных можно прочесть в книге автора «Эволюция диалога. Коммуникация в развитии: от микроорганизмов до человека», номинированной в 2014 г. на конкурс «Просветитель». Подробнее о книге см. в разделе «Новые книги», с.89.

хвостатые, к которым относятся тритоны и саламандры (около 250 ныне живущих видов). Наконец, третье подразделение — бесхвостые (лягушки и жабы) — оказалось со временем наиболее процветающим. По числу видов они составляют примерно 90% от общего числа современных нам видов амфибий (около 7 тыс.).

Предполагается, что разделение древних амфибий на эти три группы началось около 250 млн лет назад, на рубеже палеозойской и мезозойской эр. Однако типичный облик представителей каждого из этих отрядов сформировался существенно позже — примерно 165 млн лет назад. Способность же генерировать звуки и использовать их во внутривидовой коммуникации появилась лишь у бесхвостых амфибий. Она свойственна подавляющему большинству (хотя и не всем) представителей этого отряда. Именно об акустическом поведении лягушек и жаб речь пойдет далее.

### Дыхание и генерация звуков

Лягушки и жабы дышат не так, как все прочие наземные позвоночные. У них отсутствует система мышц (брюшных, межреберных и диафрагмы), которая обеспечивает механизм вдоха-выдоха, скажем, у млекопитающих. То, что можно назвать «вдохом», происходит следующим образом. Лягушка опускает нижнюю стенку ротовой полости, увеличивая тем самым ее объем. За счет этого воздух затягивается в полость через ноздри. Они затем



Филогения тетрапод и место в ней амфибий [1].

замыкаются, дно ротовой полости поднимается, и воздух устремляется в легкие через открытую голосовую щель. При выдохе сокращение мышц тела выталкивает воздух из легких наружу и его струя заставляет вибрировать парные голосовые связки, ограничивающие просвет голосовой щели.

У самца, издающего звук, рот и ноздри закрыты. Это приводит к тому, что под давлением струи воздуха расширяется полость рта, поэтому у некоторых видов она превращается в надутый пузырь, сильно выступающий вниз и вперед. В данном случае он играет роль резонатора, вибрирующего с определенной частотой и усиливающего интенсивность именно этой акустической составляющей звукового сигнала. Другой вариант резонаторов представлен двумя тонкостенными пузырями,



Резонаторы разных типов: у самцов шлемоголовой жабы (слева) и краснопятнистой, или чернопятнистой квакши. Здесь и далее фото (за исключением специально отмеченных) А.Н.Гуржия

которые раздуваются под напором воздуха по углам сомкнутых челюстей.

Эксперименты, выполненные на лягушках *Micrixalus saxicola*, обитающих по берегам стремительных водных потоков, где весьма высок уровень зашумленности, показали, что раздувающийся резонатор самца может сам по себе служить для конспецификов важным оптическим стимулом. По мнению авторов работы, он в сочетании с характерными движениями задних ног должен усиливать заметность самца для конкурентов и потенциальных половых партнеров. Здесь перед нами еще и яркий пример полимодальности сигнального поведения [2].

Интересно, что присутствие резонаторов, которое выглядят как приспособление, резко увеличивающее эффективность дистантной звуковой сигнализации, присуще далеко не всем видам бесхвостых амфибий. Пожалуй, еще любопытнее тот факт, что даже в группах близкородственных видов у одних самцов резонаторы хорошо развиты, тогда как у других — они лишь в зачаточном состоянии либо вообще отсутствуют. Более того, описана изменчивость этого признака даже в пределах одного вида. Изучение этого вопроса на примере шести близких видов лягушек рода *Rana* из западных районов Северной Америки показало, что такая ситуация имеет место у трех из них. Например, у *R.pretiosa*, по данным трех разных авторов, резонаторы либо отсутствуют, либо слабо развиты, либо представлены парными структурами внутри ротовой полости. В одних популяциях *R.draytonii* самцы лишены усилителей звука, в других они обладают парными наружными резонаторами. У двух видов резонаторы отсутствуют полностью [3]. Нет их и у представителей некоторых таксонов бесхвостых (например, австралийских роющих лягушек родов *Heleioporus* и *Neobatrachus*), которые, тем не менее, способны издавать достаточно громкие звуки. Это пытались объяснить тем, что у них сама

ротовая полость увеличена в объеме (в высоту) и, значит, сама играет роль резонатора.

Считается, что произнесение дистантных сигналов с закрытым ртом и ноздрями приводит к сужению спектра частот и, соответственно, к акцентированию несущей частоты. Такой сигнал лучше воспринимается в присутствии фоновых шумов, и тем самым увеличивается дальность его действия. Рекламную вокализацию некоторых видов можно услышать на расстоянии более километра.

Самцы лягушки *Leptodactylus albilabris*, обитающей в Карибском бассейне, во время вокализации частично погружаются в мягкий грунт, так что сильно развитый резонатор приходит в тесное соприкосновение с ним. В результате наряду со звуком, распространяющимся в воздухе, производится также вибрация, передаваемая через почву. Эти инфразвуковые колебания распространяются на дистанцию до 3–6 м, то есть охватывают все персональное пространство самца (около 1–2 м в диаметре) внутри хорового скопления нескольких особей этого пола.

### Репертуар звуковых сигналов и их акустические характеристики

Как правило, вокальные сигналы дальнего действия издают только самцы. У большинства видов их репертуар ограничивается немногими типами звуков, каждый из которых используется в разных ситуациях. Чаще всего выделяют: рекламную песню, служащую для обозначения границ индивидуальной территории самца и привлечения сюда самок, и звуки, сопутствующие непосредственным агрессивным контактам самцов. Во взаимоотношениях между самцами вокализация первого типа способствует их рассредоточению в пространстве. Это так называемое антифональное пение (дуэт, в котором партии партнеров чередуются), позволяю-



Вокально-оптическая сигнализация самцов лягушек *Micrixalus saxicola* и *Staurois parvus*.

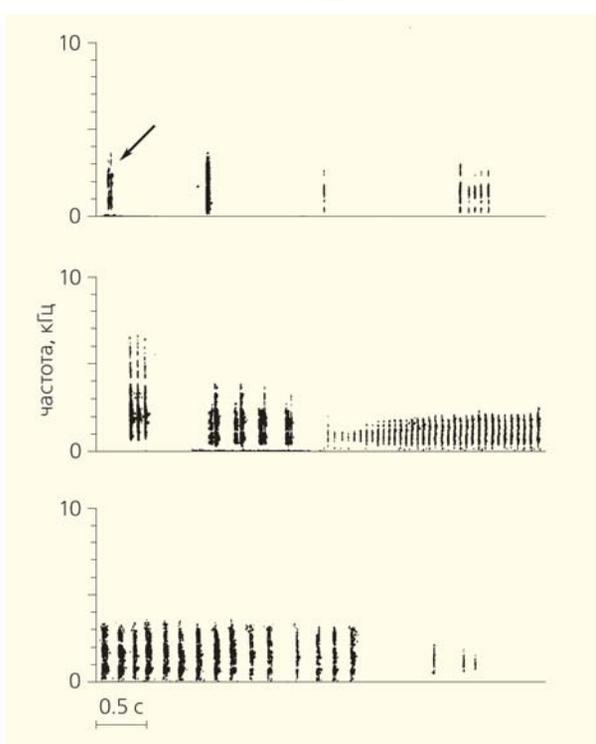
Фото Д.Прейнингера (D.Preininger)

щее каждому получать текущую информацию о местонахождении потенциальных конкурентов. Сказанное относится как к тем видам, самцы которых держатся более или менее изолированно, так и к таким, у которых они образуют компактные группировки, именуемые «хорами». Во время прямых столкновений между хозяевами соседних участков «агрессивный сигнал» второго типа нередко служит попросту концовкой рекламной песни. У ряда видов звуки, которые наблюдатель расценивает в качестве звуков угрозы, оказываются включенными, более или менее регулярно, в рекламную песню. В целом звуки, о которых идет речь, достаточно стереотипны, а вокализация каждого их исполнителя, длящаяся порой часами, воспринимается как весьма монотонная.

Известно лишь несколько исключений из этого общего правила. Например, акустический репертуар самцов южно-азиатской древесной лягушки *Polypedates leucomystax* (семейство Rhacophoridae) включает 12 типов звуков. Правда, почти половина (49%) из 1344 проанализированных звуков были однотипными; авторы отнесли их к категории «нормальных криков» [4]. Этот сигнал самец, находящийся в одиночестве, повторял реже трех раз в минуту. Дальность его действия составляла около 50 м. Это, по сути дела, и есть рекламная песня самцов данного вида, которая служила для привлечения самок. По наблюдениям авторов статьи, самки молча двигались направленно к источнику этого звука. Все прочие звуки сопровождали конфликты между самцами.

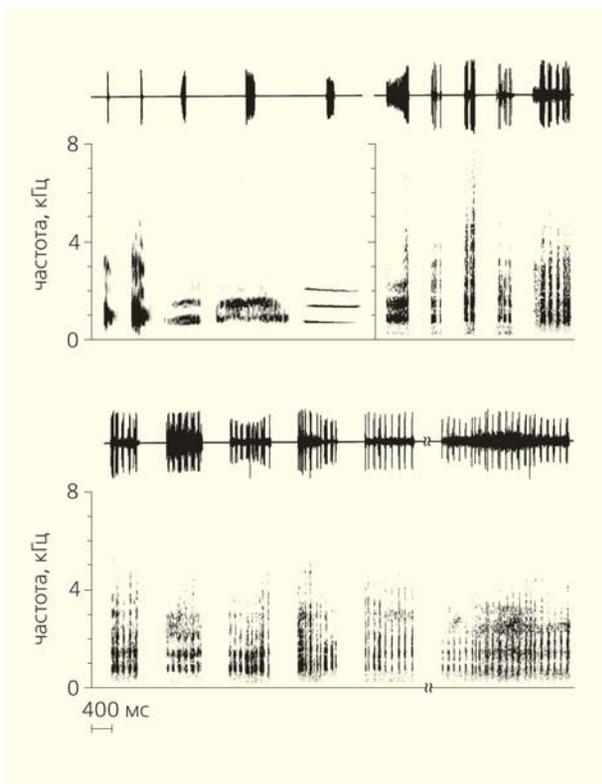
Чемпионом по разнообразию вокализации среди бесхвостых амфибий считают мадагаскарский вид *Boophis madagascariensis*, относящийся, что показательно, к тому же семейству Rhacophoridae. В репертуаре самцов насчитали 28 вариантов элементарных звуков, которые складываются по меньшей мере в восемь различных акустических конструкций. Анализ последовательностей звуков в сеансе вокализации самца показал, что разные их варианты следуют, в общем, в случайном порядке. Интересно, что не удалось обнаружить никаких морфологических особенностей голосового аппарата, которые были бы ответственны за столь уникальный характер вокализации у этого вида [5].

Помимо сигналов, именуемых рекламными и агрессивными, в репертуарах многих видов присутствует еще один звук — так называемый сигнал протеста, или высвобождения. Его издает самка, не готовая в данный момент к копуляции, в ответ на попытку самца охватить ее передними лапами, что предшествует нормальному спариванию (амплексусу). Тот же тихий звук можно слышать и от самца, которого по ошибке пытается схватить другой самец — ситуация, вполне обычная у видов, где сексуально активные самцы образуют плотные скопления. Протестный звук, в отличие от рекламных и агрессивных, производится с открытым ртом и слышен лишь на небольшом расстоянии.



Разнообразие вокализации лягушки *Polypedates leucomystax* [4]. Стрелкой на верхней сонограмме показан «нормальный крик».

У большинства видов амфибий, чья вокализация изучена достаточно полно, самки, как полагают, не издают никаких других звуков, помимо сигнала протеста. Однако у очень немногих видов описана вокализация самок, приуроченная к моментам ухаживания за ними самцов и нормальному амплексусу. О редкости этого явления свидетельствует тот факт, что такие сигналы обнаружены лишь у 4 из 19 исследованных видов рода *Rana* семейства Ranidae. Известны они также у отдельных видов жаб рода *Alytes* (семейство Discoglossidae) [6]. По своей акустической структуре эти звуки более сходны с рекламной песней самцов, нежели с сигналом протеста.



Лягушка *Boophis madagascariensis* и разнообразие ее вокализации. Показаны осциллограммы и сонограммы сигналов [5]. Вверху — самец (фото Н.Сook, Австралия) и пара в амплексусе (фото L.Denes).

Частотные характеристики звуков варьируют в широких пределах, как по высоте, так и по ширине спектра заполнения. При этом очень близкие параметры часто характеризуют систематически неродственные виды, тогда как близкие виды, относящиеся к одному роду, могут существенно различаться по названным параметрам. Это явление весьма широко распространено среди бесхвостых амфибий, причем речь может идти не только о частотных характеристиках звуков, но также об их временной организации и прочих структурных параметрах [7, 8].

### Роль рекламной вокализации самцов

В многочисленных современных исследованиях, посвященных вокализации бесхвостых амфибий, внимание сконцентрировано на том, как именно она обеспечивает контакт половых партнеров в период размножения. Ученые пытаются выявить принципы, в соответствии с которыми самки лягушек или жаб могут отдавать предпочтение тем или иным характеристикам звуковых сигналов, поступающих от разных потенциальных половых партнеров.

Первоначально большая часть таких работ была выполнена в лаборатории. Через два динамика самке одновременно транслировали магнитофонные записи голосов разных самцов данного вида. Один из выводов, сделанных на основе этой методики, состоял в том, что самки склонны отдавать предпочтение звукам с преобладанием низких частот. Известно, что низкочастотность сигналов характерна для крупных особей, поэтому последовало заключение — самки выбирают в качестве половых партнеров именно таких самцов.

В дальнейшем, когда исследования были перенесены из лаборатории в природу, эта простая идея была поставлена под сомнение, как и сама способность самок осуществлять направленный поиск конкретного самца. Все более преобладает точка зрения, высказанная, в частности, в следующей цитате. «Поиски самками половых партнеров у видов бесхвостых амфибий... резко лимитированы в естественных условиях, где рекламные сигналы самцов заглушаются средовыми шумами, которые генерируются вокализацией других видов лягушек и жаб, не говоря уже о хорах самцов-конспецификов. Поскольку самка в состоянии оценить характер звуков, издаваемых лишь немногими самцами, ближайшими к ней, возможности ее поисков ограничены лишь малой выборкой (sub-sample) потенциальных половых партнеров» [9]. Авторы добавляют, что основная задача самки в таких условиях состоит в поисках конспецифического самца, дабы избежать нежелательного межвидового спаривания.

То, что дело обстоит именно так, теперь уже подтверждено экспериментально. Например,

самки *Hyperolius marmoratus* в тестах на одно-временный выбор из нескольких видоспецифических сигналов с разными частотными характеристиками действительно отдают предпочтение тем, которые лежат в нижней зоне спектра. Однако при увеличении числа самцов, участвующих в хоровой вокализации, реакции тестируемых самок меняются — они становятся не столь разборчивыми и могут остановить свой выбор на половом партнере, издающем звуки иной структуры [10]. То же самое показано в отношении самок квакши *Hyla ebraccata*. В отсутствие шума (соотношение сигнал/шум >25 дБ) они предпочитают низкочастотные видоспецифические сигналы. При умеренных уровнях шума (6 и 9 дБ) возможность распознавать звуки снижается. При высокой зашумленности предпочтения самок к низкочастотным сигналам уступают место поискам источникам таких, которые по частотным характеристикам соответствуют модальным для изученной популяции. Таким образом, у самок снижается способность к распознаванию частотных характеристик рекламной вокализации самцов даже при умеренных уровнях зашумленности акустического канала связи [11].

Понятно, что истинный ход событий может быть различным у разных видов, в зависимости от общих особенностей их биологии размножения. Наиболее важным фактором здесь оказывается характер размещения самцов в пространстве в период размножения. В этом плане все виды можно разделить на две основные категории.

К одной из них относятся те, у которых размножение не приурочено к какому-то краткому периоду времени. Самцы остаются, постоянно или эпизодически, в пределах своих индивидуальных участков и активно рекламируют свое присутствие видоспецифическими сигналами, по большей части (хотя и не всегда) акустическими. Эти участки посещают готовые к спариванию самки. Образ жизни разных видов, относящихся к этой категории, может быть принципиально различным — главным образом, в зависимости от того, насколько сильно взрослые особи и особенно личинки нуждаются в воде. Это обстоятельство определяет в значительной степени и характер взаимоотношений между полами у разных видов, например, в сфере заботы о потомстве. У большинства видов особи обоих полов остаются в период размножения привязанными к открытым акваториям. Но есть виды, которые приспособились обходиться в это время вообще без воды, либо нашли способ пользоваться лишь ограниченными ее количествами, иначе личинки-головастики не смогли бы выжить.

У видов второй категории период размножения ограничен сжатými сроками. Подавляющее большинство привязаны в период размножения к акваториям большей или меньшей площади, где самцы вынуждены концентрироваться, формируя

плотные агрегации. В результате численность самцов и плотность их размещения в водоеме оказываются весьма значительными. Из-за этого конкурентные взаимоотношения между ними принимают хаотичный характер. Контакты становятся преимущественно неупорядоченными, что придает происходящему характер непрекращающейся свалки. Такие системы получили название «взрывных».

Посмотрим теперь на нескольких примерах, что же все-таки удалось узнать о роли вокализации самцов как показателя их привлекательности для самок.

### Лягушки древолазы

Эти амфибии семейства Dendrobatidae замечательны тем, что существенно продвинулись в направлении сугубо наземного образа жизни. К семейству относятся около 250 видов этих ядовитых древесных лягушек, обитающих в Южной Америке. Их образ жизни детально изучен на примере 12 видов [12]. Это типичные представители первой категории, поскольку размножение у них идет круглый год. У девяти изученных видов территориальны только самцы, у одного — только самки, а у двух (предположительно) особи обоих полов. Площадь территорий особи обычно не превышает 5 м<sup>2</sup>, но для некоторых приводятся значительно большие величины (до 7, 11, 16 и даже 44 м<sup>2</sup>). Для девяти видов описана вокализация самцов, служащая для охраны территории и привлечения самок.

После спаривания на влажном субстрате кто-либо из родителей охраняет кладку, а после вылупления головастиков этот член временной пары переносит их на спине туда, где есть хоть немного воды. Многие виды дендробатид используют для этой цели розетки листьев эпифитных растений из семейства бромелиевых (*Bromeliaceae*), в которых скапливается дождевая вода. Это свойственно, в частности, амазонским лягушкам вида *Dendrobates ventrimaculatus*, у которых головастиков в эти розетки транспортируют самцы, а самки подкармливают свое потомство яйцами, если появляется опасность высыхания личинок [13].

У этого вида территории самцов локализованы в местах с наибольшей плотностью бромелий. Самки, участки обитания которых больше территорий самцов, должны быть хорошо осведомлены о распределении на местности колыбелей для будущих головастиков. Поскольку в данном случае, в отличие от ряда других видов дендробатид, самцы не практикуют широковегетативную рекламную вокализацию, очевидно, что самки выбирают территории тех самцов, где бромелии произрастают в наибольшем количестве. После появления самки на территории самца она следует за хозяином участка, обходящим последовательно известные ему эк-



Золотистый древолаз (*Dendrobates auratus*) в бромелии.

земляры бромелий. Эта церемония, сопровождаемая вокализацией самца, может длиться несколько часов. Нередко один и тот же экземпляр растения пара посещает несколько раз. Вокализация самца может привлечь на место действия самца-соперника. В таких случаях хозяин участка отвлекается от взаимодействия с самкой, пытаясь изгнать пришельца с помощью угрожающих вокальных сигналов и прямого физического контакта с ним. Иногда пришлому самцу удается увести самку на свою территорию. Все это говорит о том, что при поисках полового партнера самка может ориентироваться главным образом на качество его территории, а не на характер его вокализации.

У амазонского вида *D. pumilio* самцы занимают участки обитания площадью до 25–55 м<sup>2</sup> (в среднем в разных популяциях 11.0–16.5 м<sup>2</sup>), охраняя внутри них территории величиной от 0.3 до 5 и более квадратных метров посредством рекламной вокализации. Дистанция между кричащими самцами может составлять 2–3 м. Когда чужак приближается к территории хозяина, тот сменяет рекламное пение на агрессивный сигнал, воспроизводя его в форме антифонального дуэта с пришельцем.

Как выяснила Х.Прол, на протяжении девяти месяцев половой активности количество спариваний самца варьирует в разные годы от нуля до 18 или даже 26. Самец может спариваться подряд с двумя и тремя самками. Прол поставила своей задачей оценить зависимость репродуктивного успеха самца от характера его вокализации и пришла к выводу, что единственный показатель, коррелирующий с успехом самца, — это уровень его акустической активности, которая выражается в высокой, устойчивой повторяемости сигналов во времени [12, 14]. Физические параметры сигнала (такие, как его частотные характеристики

и длительность отдельных криков) можно в этом плане не принимать во внимание.

Во-вторых, как пишет автор, сомнительно, чтобы самка могла оценивать качество партнеров, основываясь только на уровне их акустической активности. Во-первых, самка не в состоянии оценить значение этого параметра за длительное время. Во-вторых, тот факт, что она может отвергнуть самца, уже пребывая на его территории, говорит, по мнению автора, о том, что ее выбор основывается на иных стимулах, действующих на небольших расстояниях (очевидно, химических). Кроме того, поскольку участок обитания самки перекрывает территории обитания двух-шести самцов, она вынуждена ограничиваться этой небольшой выборкой, что не дает возможности вывести строгие корреляции между особенностями вокализации самца и его репродуктивным успехом.

Прослеживание судьбы одних и тех же самцов на протяжении двух лет показало, что их успех у самок повышается с возрастом и связан с длительностью удержания ими территорий. В отличие от многих других исследований по вокализации бесхвостых амфибий, не удалось найти корреляции между доминантной частотой сигнала и размерами и массой самцов, а также указаний на то, что при выборе полового партнера эти лягушки ориентируются на его общие размеры.

### Гиперолииды, квакши, филломедузы

Амфибии этих таксонов отличаются от прочих видов лягушек с растянутым сезоном размножения лишь тем, что у этих амфибий самцы присутствуют на своих индивидуальных участках эпизодически, а не постоянно, как у древолазов-дендробатид. Таковы, в частности, мелкие лягушки из семейств Hyperoliidae и Hylidae (куда относятся квакши рода *Hyla* и филломедузы рода *Phyllomedusa*). Все они ведут наземно-древесный образ жизни, концентрируясь только эпизодически вблизи водоемов и/или на полупогруженной в воду растительности из-за потребности оставить потомство. Группировки самцов этих видов принято называть «хоровыми сборищами».

В тех исследованиях по этим видам, где обсуждается тема успеха самцов у самок, важное значение придают временным показателям присутствия самца в такого рода агрегациях. Как пишут М.Дайсон с соавторами, «...некоторые фенотипические особенности самца, такие как настойчивость в эманации вокальных сигналов и их длительность, существенно влияют на частоту спариваний самца. Но в качестве наиболее важного фактора считают время его пребывания в группе кричащих соперников» [15].

В брачных агрегациях квакши *Hyla regilla* дистанции между самцами варьируют от 40 до 130 см, максимально — до 190 см. Модальное значение

равно 90–100 см. Средняя дистанция между кричащими самцами квакши *Hyla goiana* составляет  $2.7 \pm 1.5$  м, значения менее 1 м наблюдали редко [16]. У вида *Hyperolius marmoratus*, особи которого примерно такой же величины (до 4.5 см в длину), средняя дистанция между самцами в агрегациях еще значительнее, в среднем  $7.58 \pm 6.45$  м (в 75% случаев менее 10 м) [17]. В отличие от этих видов, хоровые сборища которых формируются на поверхности акватории, у филломедуз самцы концентрируются на ветвях деревьев или кустарников, нависающих над водой. Здесь самец филломедузы *Phyllomedusa robdei* перемещается между своими песенными постами в радиусе около метра ( $101.7 \pm 50.0$  см) [18].

Поведение африканской раскрашенной лягушки (*Hyperolius marmoratus*) группа исследователей во главе с М.Дайсон изучала на протяжении всего сезона размножения, с сентября по февраль. Самцы, участвующие в хоре, держатся в водоеме на выступающей из воды растительности. Они активны только в темное время суток, когда можно слышать их хоровую вокализацию. Чем многочисленнее самцы в составе агрегации, тем меньше дистанция между ними. В среднем в радиусе 10 м вокруг самца присутствуют 5–7 других.

Состав самцов в данном фрагменте водоема непостоянен. Время пребывания здесь самца составляет от одной до 11 ночей (в среднем  $2.4 \pm 1.6$ ). 79.5% самцов присутствовали в составе хора три ночи или менее. В среднем только 20% самцов были встречены две ночи подряд. Те, которых отмечали повторно, оставались неподалеку от места своего пребывания в предыдущую ночь: 80% на расстоянии не более 8 м от него и почти 50% — вдвое ближе.

Удалось показать, что у самца, который спарился однажды, повышается вероятность добиваться успеха в дальнейшем. Выяснили также, что продолжительность вокализации у таких самцов в каждую данную ночь меньше (в среднем на 2.5 часа), чем у тех, которые не получили доступа к самкам. Первые транслируют в среднем 2137 звуковых сигналов (разброс от 9 до 7286), вторые — 6110 (1852–11281) [17]. Авторы не объясняют причин этих различий, но можно думать, что участие в спаривании ведет к снижению половой мотивации и, соответственно, к снижению интенсивности саморекламиривания.

У филломедуз самки откладывают яйца в свернутый лист дерева или куста, нависающего над водой. Сворачивание листа осуществляется или самкой, готовой к спариванию, или обоими партнерами после садки самца на самку [18–20]. Вышедшие из яиц головастики падают в воду и там завершают свое развитие.

Группа зоологов во главе с Х.Фогель исследовала в деталях брачное поведение вида *Phyllomedusa robdei* в Бразилии, на пересыхающем водоеме площадью около 170 м<sup>2</sup> [18, 19]. Число крича-

щих самцов варьировало в разные ночи от 8 до 61 (в среднем  $26.6 \pm 14.3$ ). При сравнительно невысокой плотности самцов в хоре выявлена очевидная тенденция к неслучайному, контагиозному, их размещению. Число самцов в кластерах составляло от 2 до 6 ( $3.2 \pm 1.0$ ).

Самцы держались на ветвях прибрежной растительности на высоте около полуметра и не далее 70 см от воды. Здесь они перемещались с ветки на ветку в радиусе около метра, оставаясь на той или иной присаде по 6–7 мин. При остановках они вертели головой или поворачивались всем телом в разные стороны, изучая окружающую обстановку. Самцов подразделяли на две группы: «державшихся вместе» (ДГ) и «изолированных» (И). К числу первых относили тех, от которых в радиусе 1 м присутствовал хотя бы еще один самец. И-самцы находились на расстоянии более метра от всех прочих. Вокализация самцов не была одновременной и постоянной. Интервалы между сериями сигналов длились по несколько минут. И-самцов можно было видеть в хорах любой величины.

В зоне хора на протяжении ночи находилось не более 10 самок. Каждая из них, приближаясь к скоплению самцов, перемещается с ветки на ветку, явно разыскивая нависающий над водой лист, пригодный для постройки гнезда. Найдя подходящий лист, она пробует его пригодность и может переместиться на другой. Когда самка свертывает лист, работая всеми четырьмя лапами, к ней быстро приближается самец, иногда издавая



Борьба самцов красноглазой квакши (*Agalychnis callidryas*) за самку.

при этом тихий вариант рекламного звукового сигнала. Если активных самцов более одного, они начинают конфликтовать друг с другом, что подчас переходит в подобие драки. Самец, оказавшийся первым рядом с самкой, сразу же делает садку на нее. После того, как произошел амplexус, самка начинает откладывать яйца, одновременно оплодотворяемые самцом.

Двадцать семь (55%) спариваний из 49 осуществили ДГ-самцы, 18 (37%) — И-самцы. При этом показано, что те и другие не различались достоверно ни по размерам ( $39.2 \pm 1.7$  и  $38.4 \pm 2.9$ , соответственно), ни по массе тела. Единственным показателем, коррелирующим с успехом самцов, оказалось число ночей, проведенных тем или иным из них в составе хора.

Следует заметить, что у *Hyperolius marmoratus* и квакш рода *Hyla* (в отличие от филломедуз) самка, идущая на крики самца, движется очень медленно и целенаправленно, с остановками. Самец *H.marmoratus*, опознающий самку с расстояния около 20 см, остается неподвижным и лишь увеличивает темп вокализации. Только после того, как самка коснулась его, он делает садку. Создается впечатление, что самки избегают тех самцов, которые проявляют двигательную активность в момент сближения потенциальных партнеров. Аналогичную картину мы видим у европейской квакши. Даже когда самка оказывается в нескольких сантиметрах от самца, он продолжает кричать и никогда не делает садку, пока она не коснется его мордой. Также и самцы, кричащие на расстоянии в несколько сантиметров от пары в амplexусе, не предпринимают попыток сместить самца, добившегося успеха. Исследователи никогда не

наблюдали у этого вида активного поиска самцами самок [9]. Совершенно аналогичное поведение партнеров в преддверии амplexуса описано также у зеленой лягушки *R.clamitans*, относимой к категории территориальных видов [21] — в противоположность тому, что мы видим у «территориальных» филломедуз.

### Виды с взрывной системой размножения

Период размножения таких видов занимает обычно от нескольких дней до двух недель, как это описано, например, для пяти видов американских лягушек рода *Rana*. У них икрометание происходит весьма синхронно, так что большая часть самок откладывает яйца на протяжении одной ночи [22]. В репродуктивных агрегациях этих амфибий дистанции между самцами сопоставимы с размерами их тела. Агрегации самцов часто бывают очень плотными, состоящими из сотен особей. Например, у озерной лягушки *R.ridibunda* насчитывали от 25 до 30 особей на  $m^2$ , при дистанциях между самцами в 10—20 см. Самцы пытаются делать садку на ближайших к ним особей, вне зависимости от их пола. Иногда до пяти—шести самцов борются за обладание одной самкой [22]. Естественно поэтому, что в ситуации хаотической «борьбы без правил» всех со всеми (scramble competition) преимущество получают, хотя и не всегда, более крупные в среднем самцы старших возрастных групп, способные отбить самку у меньших по размерам конкурентов. При этом победитель может даже вытеснить самца, уже схватившего самку, и занять его место. Такое явление описано для 10 из 14 видов жаб рода *Bufo*, детально изученных в этом отношении, и для двух из четырех видов лягушек рода *Rana*.

Важно заметить, что как только внешние условия позволяют удлинить период размножения, взрывная система уступает место более или менее четко выраженной территориальности. Последняя описана у двух североамериканских видов зеленых лягушек: *R.catesbeiana* и *R.clamitans*. Как показал Т.Вайвандт, три наиболее активно кричавших самца первого из этих видов занимали широко разнесенные в пространстве участки пруда площадью  $30 \times 25$  м и охраняли от посягательств конспецификов фрагменты береговой линии длиной от 9 до 25 м [23]. У второго вида размеры участков самцов зависят от плотности водной растительности. В плотных за-



Вокализирующий самец листолаза Энтони (*Epidobates anthonyi*).

рослях камыша, где видимость ограничена, самцов-соседей разделяли дистанции в 1.0—1.5 м. Там, где участки водной глади были обширнее, самцы охраняли зоны диаметром 4.0—6.0 м, стараясь не выходить за их границы и не вступать в конфликты с соседями [21]. Этот автор не обнаружил очевидных поведенческих различий между самцами и пришел к выводу, хорошо обоснованному эмпирически, согласно которому самки ориентируются не на размеры и/или акустическую активность самцов, но на качество их территорий. После посещения нескольких из них самка останавливается,

как правило, на участках с наиболее плотными зарослями элодеи, создающими наиболее благоприятные условия для развития яиц.

Можно было бы привести немало примеров того, какую важную роль в коммуникации лягушек и жаб играют другие сигнальные средства — окраска половых партнеров, обонятельные стимулы и тактильные ощущения во время амplexуса. У некоторых видов степень развития этих каналов связи такова, что животные попросту обходятся без обмена звуковыми сигналами на расстоянии. Но это — уже совсем другая тема. ■

## Литература

1. Amemiya C.T., Alföldi J., Lee A.P. et al. The African coelacanth genome provides insights into tetrapod evolution // Nature. 2013. V.496. №7445. P.311—316. doi:10.1038/nature12027.
2. Preininger D., Boeckle M., Freudmann A. et al. Multimodal signaling in the Small Torrent Frog (*Micrixalus saxicola*) in a complex acoustic environment // Behav. Ecol. Sociobiol. 2013. V.67. №9. P.1449—1456. doi: 10.1007/s00265-013-1489-6.
3. Hayes M.H., Krempels D.M. Vocal sac variation among frogs of the genus *Rana* from western North America // Copeia. 1986. V.4. P.927—936.
4. Christensen-Dalsgaard J., Ludvig T.A., Narins P.M. Call diversity in an Old World treefrog: Level dependence and latency of acoustic responses // Bioacoustics. 2002. V.13. №1. P.21—35. doi:10.1080/09524622.2002.9753484.
5. Narins P.M., Lewis E.R., McClelland B.E. Hyperextended call note repertoire of the endemic Madagascar treefrog *Boopis madagascariensis* (Rhacophoridae) // J. Zool. Lond. 2000. V.250. P.283—298.
6. Emerson S.B., Boyd S.K. Mating vocalizations of female frogs: Control and evolutionary mechanisms // Brain Behav. Evol. 1999. V.53. P.187—197.
7. Rand S. Tradeoffs in the evolution of frog calls // Proc. Indian Acad. Sci. (Anim. Sci.) 1985. V.94. №6. P.623—637.
8. Fears B.A.C. Laryngeal apparatus and call structure in North American hylids // A Thesis for the Degree master of science, Missouri Uniiiv. of Science and Technology. 2010.
9. Friedl T.W.P., Klump G.M. Sexual selection in the lek-breeding European treefrog: body size, chorus attendance, random mating and good genes // Anim. Behav. 2005. V.70. P.1141—1154.
10. Telford S.R., Dyson M.L., Passmore N.I. Mate choice occurs only in small choruses of Painted Reed Frogs *Hyperolius marmoratus* // Bioacoustics: The International Journal of Animal Sound and its Recording. 1989. V.2. №1. P.47—53.
11. Wollerman L., Wiley R.H. Background noise from a natural chorus alters female discrimination of male calls in a Neotropical frog. Anim. Behav. 2002. V.63. P.15—22.
12. Pröhl H. Territorial behavior in dendrobatid frogs // J. Herpetol. 2005. V.39. №3. P.354—365. doi:10.1670/162-04A.1.
13. Poelman E.H., Dicke M. Space use of Amazonian poison frogs: Testing the reproductive resource defense hypothesis // J. Herpetol. 2008. V.42. №2. P.270—278.
14. Pröhl H. Variation in male calling behaviour and relation to male mating success in the Strawberry Poison Frog (*Dendrobates pumilio*) // Ethology. 2003. V.109. №4. P.273—290. doi:10.1046/j.1439-0310.2003.00863.x.
15. Dyson M.L., Henzi S.P., Halliday T.R., Barrett L. Breeding success in mating male reed frogs (*Hyperolius marmoratus*) // Proc. R. Soc. Lond. 1998. V.265. P.1417—1421.
16. Menin M., Silva R.A., Giaretta A.A. Reproductive biology of *Hyla goiana* (Anura, Hylidae) // Iheringia. Sér. Zool. 2004. V.94. №1. P.49—52.
17. Dyson M.L., Passmore N.I., Bishop P.J. Male behavior and correlates of mating success in a natural population of African Painted Reed Frogs (*Hyperolius marmoratus*) // Herpetologica. 1992. V.48. №2. P.236—246.
18. Wogel H., Abrunbosa P.A., Pombal J.P. Jr. Breeding behaviour and mating success of *Phyllomedusa robdei* (Anura, Hylidae) in south-eastern Brazil // J. Nat. Hist. 2005. V.39. №22. P.2035—2045.
19. Wogel H., Abrunbosa P.A., Pombal J.P. Jr. Choruses organization in the leaf-frog *Phyllomedusa robdei* (Anura, Hylidae) // Herpetol. J. 2006. V.16. P.21—27.
20. Rodrigues D.J., Uetanabaro M., Lopes F.S. Breeding biology of *Phyllomedusa azurea* Cope, 1862 and *P. sauvagii* Boulenger, 1882 (Anura) from the Cerrado, Central Brazil // J. Nat. Hist. 2007. V.41. №29—32. P.1841—1851.
21. Wells K.D. Territoriality and male mating success in the Green Frog (*Rana clamitans*) // Ecology. 1977. V.58. №4. P.750—762.
22. Wells K.D. The social behaviour of anuran amphibians // Anim. Behav. 1977. V.25. №3. P.666—693.
23. Wiewandt T.A. Vocalization, aggressive behavior, and territoriality in the bullfrog, *Rana catesbeiana* // Copeia. 1969. P.276—285.

# О чем говорили наши далекие предки

Ю.Е.Березкин, С.А.Боринская

Многие тысячелетия могут пролежать в земле предметы материальной культуры из камня или обожженной глины. По ним археологи реконструируют облик культуры для отдельных ареалов и периодов, датируя находки точными методами (например, по содержанию в образцах радиоактивного углерода). Однако даже самая изощренная обработка археологического материала не поможет восстановить истории, которые рассказывали создатели этих культур. Тем не менее, устные повествования тоже не исчезают бесследно, только детали их сохраняются не в земле, а в фольклоре, передающемся из поколения в поколение\*. Вопрос лишь в том, как выделить в совокупности современных записей «отложения» разных эпох\*\*.

Сто лет назад английский ученый Джеймс Фрэнгер, автор

\* Подробнее см.: Ю.Е.Березкин. Мифы глубокой древности // Природа. 2005. №4. С.55—61.

\*\* Изложенные в статье результаты получены на основе анализа огромного массива материалов по фольклору и мифологии народов мира, содержащегося в текстах, разбросанных по многим сотням разноязычных публикаций. Каталог фольклорных и мифологических мотивов, выявленных в этих публикациях, доступен на сайте <http://www.ruthenia.ru/folklore/berezkin>.



**Юрий Евгеньевич Березкин**, доктор исторических наук, заведующий отделом народов Америки Музея антропологии и этнографии им.Петра Великого (Кунсткамера) РАН. Основные научные интересы: заселение Америки, становление ранних цивилизаций Старого и Нового Света, создание электронных каталогов фольклорно-мифологических мотивов.



**Светлана Александровна Боринская**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории анализа генома Института общей генетики им.Н.И.Вавилова. Основные научные интересы: генетическое разнообразие человечества, антропогенез, биологическая и социальная эволюция, генетика в междисциплинарных исследованиях.

одной из самых популярных книг начала и середины XX в., «Золотой ветви», искал в легендах и мифах разных народов параллели сказаниям, содержащимся в Библии [1]. Он считал, что в ней сохранились реликты древних преданий, некогда характерных для всего человечества. Среди прочего его заинтересовала история грехопадения, в которой, как известно, действует змей, соблаздивший Еву. Истории с участием змея он обнаружил у народов Африки, Индокитая, Южной Америки. Только речь там шла не о грехопадении, а об утрате бессмертия.

За время, прошедшее после издания этой знаменитой книги, похожие истории обнаружены у десятков народов. Во многих из них говорится, что змеи бессмертны потому, что меняют кожу и омолаживаются. В предании эфиопского народа, отмеченном еще Фрэнгером, рассказывается: «Бог послал птицу сказать людям, что, состарившись, они будут менять кожу и возрождаться. По пути птица увидела змею и обещала передать весть ей, если та поделится пищей. Змея со-

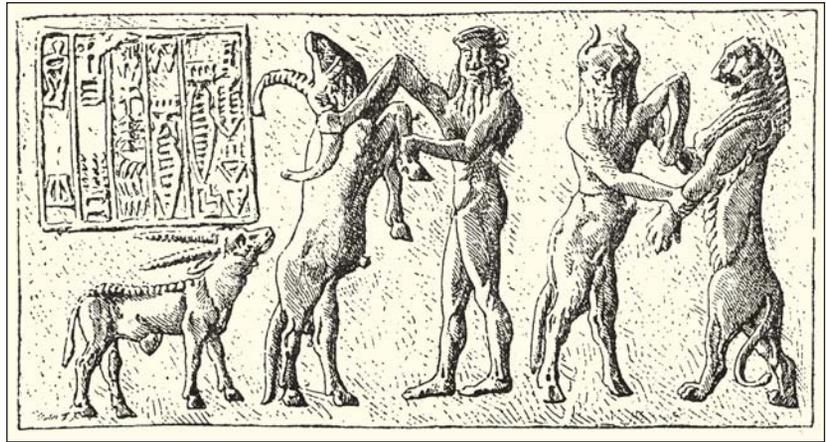
гласилась. Тогда птица сказала, что змеи будут сбрасывать кожу и молодеть, а люди — стариться и умирать безвозвратно. С тех пор так и повелось». А вот сказание народа луба в Конго, говорящего на языке банту. «Вначале Бог предложил на выбор женщины и змее орех со смертию и орех с бессмертием, женщина взяла смерть, змея — бессмертие. Теперь змеи не умирают, а лишь сбрасывают кожу» [2].

В некоторых рассказах присутствует мотив непослушания, как, например, у бирманских нага: «Люди жили до старости, а змеи меняли кожу и были бессмертны. Один из духов спросил людей, не хотят ли они жить вечно, как змеи, но вождь отказался его слушать, сказав, что люди обойдутся без его советов. Поэтому люди не возрождаются, сбрасывая кожу, как змеи».

Иногда змею заменяет ящерица, креветка или сверчок, либо людей сравнивают с деревьями, меняющими кору, как в мифе народа атайл, живущего на Тайване: «Бог попросил людей вымыть его, обещая, что они станут сбрасывать кожу, как мирт меняет свою кору, и не будут стариться и умирать. Но люди отказались. Тогда бог сказал, что теперь умирать станут все, даже дети».

Все перечисленные тексты записаны этнографами и фольклористами в XIX—XX вв., сохранившихся чаще всего благодаря изустной передаче. Но сам сюжет гораздо древнее. Есть письменные свидетельства того, что история утраты бессмертия, связанного со сменой кожи, была известна 3 тыс. лет назад на Ближнем Востоке и в восточном Средиземноморье. Она записана на аккадских клинописных табличках, датированных VII в. до н.э. (раскопки в Ниневию): там рассказывается, что Гильгамеш после смерти своего друга Энкиду добыл цветок бессмертия, но его украли змея, которая сбросила старую кожу и стала бессмертной. Судя по более ранним фрагментам, эпос о Гильгамеше сложился в конце 3-го тысячелетия до н.э. Но есть основания полагать, что история со сменой кож гораздо древнее. Определить эпоху, в которой сюжет пересказывался, можно по географическому ареалу его современного распространения.

Отметим важную особенность. В приведенных выше примерах явно имеются общие детали, но не идет речь об идентичности или сходстве длинных и сложных рассказах. Цепочки эпизодов, из которых они состоят, вряд ли сохраняются в неизменности на протяжении многих тысячелетий. Мы сейчас говорим о самих эпизодах, о более или менее компактных элементах, своего рода кирпичиках, из которых построены длинные тексты и ко-



Оттиск аккадской печати конца III тыс. до н.э. Согласно месопотамскому мифу, после смерти своего друга Энкиду Гильгамеш добыл «цветок бессмертия», но его украли змея, сбросила старую кожу и стала бессмертной.

торые можно использовать в разных сочетаниях. Такие «кирпичики» мы будем называть мотивами.

Если мы можем исключить независимое появление сходных мотивов в разных концах света, то распространение какого-либо мотива по обширному ареалу должно соответствовать потокам миграций, с которыми он мог быть принесен его носителями. Благодаря успехам генетиков и археологов, мы знаем основные пути и даты заселения человеком различных континентов\*. История расселения человечества поможет нам определить историю появления и распространения описанного выше мотива «бессмертие и смена кожи».

### Как люди заселили Землю

Согласно генетическим данным, примерно 70 тыс. лет назад люди покинули Африку, переправились через узкий пролив, отделявший ее от Аравии, и стали двигаться на восток вдоль берега океана, используя богатые пищевые ресурсы береговой полосы [3]. В то время уровень моря был на несколько десятков метров ниже современного (максимально на 130 м около 20 тыс. лет назад), поэтому археологи до сих пор не нашли следов самых ранних мигрантов. Ясно лишь, что не позже чем 50 тыс. лет назад люди современного типа появились в Австралии. Об этом говорят исследования ДНК народов, живущих сегодня в Южной и Юго-Восточной Азии, Меланезии и Австралии.

Центральные и северные районы Евразии люди освоили на 20—30 тыс. лет позже. На севере они столкнулись с совершенно другими, непривычными для них природно-климатическими условиями. Заселение Нового Света произошло не позже, чем

\* Подробнее см. Н.К.Янковский, С.А.Боринская. Наша история, записанная в ДНК // Природа. 2001. №6. С.10—17.

14–15 тыс. лет назад. Об этом говорит современная датировка стоянки Монте-Верде на юге Чили.

Еще недавно археологи предполагали, что самыми древними в Америке были создатели культуры кловис. Считали, что пришли они через Берингию, располагавшуюся на месте нынешних Чукотского и Берингова морей, а затем по долинам рек Юкон и Маккензи, где тогда был свободен ото льдов узкий коридор между Лаврентийским и Кордильерским ледниковыми щитами. До открытия этого коридора проникнуть к югу от Берингии можно было только вдоль южной Аляски, переплывая от одного острова к другому. Предполагается, что, как и при освоении Евразии, в Америке первые мигранты устремились вперед вдоль побережья, где пищевые ресурсы наиболее обильны. Но затем прибрежная полоса ушла под воду, и потому археологические следы этих береговых миграций недоступны. Позже всего была заселена высокая Арктика — туда, в Гренландию, в середине III тысячелетия до н.э. устремились люди из Старого Света, в котором остальные пригодные для жизни территории уже были заняты.

Как полагают генетики, источником первоначального заселения Америки было древнее население Евразии, потомки которого сейчас живут в Южной Сибири, Восточной и Юго-Восточной Азии [4]. Таков исторический сценарий, знание которого поможет нам определить возраст эпизода со сменой кожи и утратой человеком бессмертия.

### География записей фольклорного сюжета

Согласно детальному анализу, более 50 тыс. мифологических и фольклорных текстов, записанных у народов всего мира, история со сменой кожи совершенно неизвестна в северной и континентальной Евразии, но весьма популярна в Африке южнее Сахары, в Юго-Восточной Азии, Меланезии и Южной Америке. В Австралии она зафиксирована у нескольких групп на северном побережье. География записей соответствует южному маршруту расселения людей современного типа из Африки: сначала в Южную и Юго-Восточную Азию и Австралию, затем в Новый Свет [5].

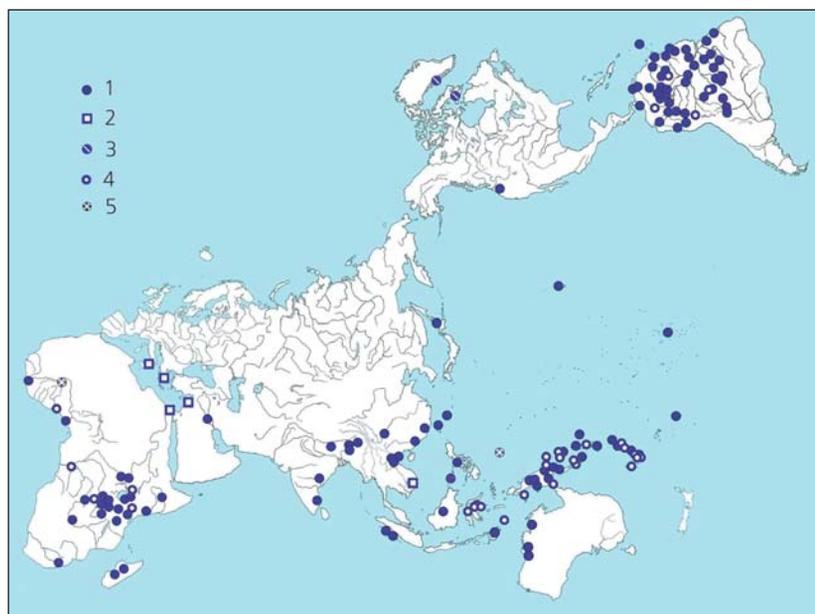
Возможно ли, чтобы, выходя из Африки 70 тыс. лет назад, люди принесли с собой историю, которая в устной передаче на протяжении 2–3 тыс. поколений сохранила основной мотив

так, что он остался узнаваемым через десятки тысячелетий, преодолев путь в десятки тысяч километров?

Такая невообразимо древняя датировка мотива о смене кожи непривычна для фольклористов и историков литературы, мыслящих обычно в масштабе десятилетий и столетий, в крайнем случае — немногих тысячелетий. И, конечно, Дж.Фрэзеру, изучавшему древние реликты в фольклорных текстах в начале XX в., трудно было представить, о каком возрасте преданий может идти речь. Какие возражения можно выдвинуть против 50–70 тысячелетней древности рассматриваемого мотива?

Мотив со сменой кож мог возникнуть независимо в разных регионах, и тогда сходство между преданиями разных народов о бессмертии случайно. Однако во всех областях, где эти истории зафиксированы, некоторые повествования включают дополнительную подробность — старика или старуху побеспокоили в тот момент, когда они меняли кожу, и именно поэтому люди перестали омолаживаться. Сочетание таких деталей делает независимое появление подобных историй в Африке, Азии и Америке маловероятным.

Читатель вправе спросить: а не попал ли наш миф в Южную Америку не через Восточную Азию и Северную Америку (где он почти не встречается), а прямо из Африки, вместе с рабами, которых во множестве завозили в Бразилию и Гвиану в XVII–XVIII вв.? Нет, эту гипотезу можно отвергнуть. Хотя



Распространение вариантов мотива «Смена кожи как условие бессмертия»: 1) люди смертны, потому что не могут менять кожу и омолаживаться; 2) змеи бессмертны, потому что меняют кожу и омолаживаются (объяснение происхождения смерти отсутствует); 3) конкретный персонаж, а не люди вообще меняет кожу и становится молодым; 4) старика побеспокоили в тот момент, когда он менял кожу, поэтому люди перестали омолаживаться и умирают; 5) то же, что (4), но омоложение не связано со сменой кожи.

африканские тексты содержат тот же главный мотив, что и южноамериканские, в них все же есть и другие подробности, отсутствующие в Америке. К тому же миф о смене кожи в Африке более всего характерен для ее восточных и центральных областей, а вблизи атлантического побережья таких записей мало. Между тем черных рабов в Америку завозили именно из Гвинеи и Анголы, но не из Кении. В Америке основная масса негритянского населения оказалась сосредоточена на северо-востоке Бразилии и на юго-востоке США, где мотив смены кожи в фольклоре отсутствует. Судя по тому, что у негров, живущих в США, Бразилии и Гвиане, истории рассказывают о том, как одно животное обманывает другого, следует что черные рабы привезли в Америку сказки о животных, а не мифы об утраченном былом бессмертия.

Тем более мотив смены кожи не могли разнести по миру европейцы или китайцы. В Европе его попросту нет (хотя в античных текстах отмечаются его отголоски), а в Китае данный мотив встречается редко и только на юге. Во второй половине XIX в. китайские рабочие приезжали в Перу, но не в Амазонию. Отсутствие мотива в Северной Америке также имеет свое объяснение. Культурное наследие самых ранних мигрантов оказалось там отчасти вытеснено более поздними волнами заселения. Это касается не только мотива смены кож. Есть десятки других сюжетов и мотивов, которые связывают Южную Америку с Меланезией и Юго-Восточной Азией, а Северную — с Сибирью [6].

В Австралии мотив смены кожи зафиксирован лишь в северных районах. Не удалось нам найти его и в записях фольклора койсанских народов Африки, о которых генетики и лингвисты говорят, что их языки и генетические линии первыми отделились от остального человечества. Не означает ли данное распределение, что самые первые мигранты из Африки этот мотив не знали, и возник он несколько позже, примерно 50-40 тыс. лет назад? Генетики пока не могут точно сказать, сколько именно было «выходов из Африки» и как их точно датировать, но ясно, что процесс этот был многократным. В связи с этим интересно сравнить ареал мотива смены кожи с ареалом другого популярного мотива о происхождении смерти — противопоставления людей и Луны. Именно он лежит в основе повествований, объясняющих смертную природу людей, у всех койсанских групп Южной Африки, и он же популярен среди аборигенов Австралии.

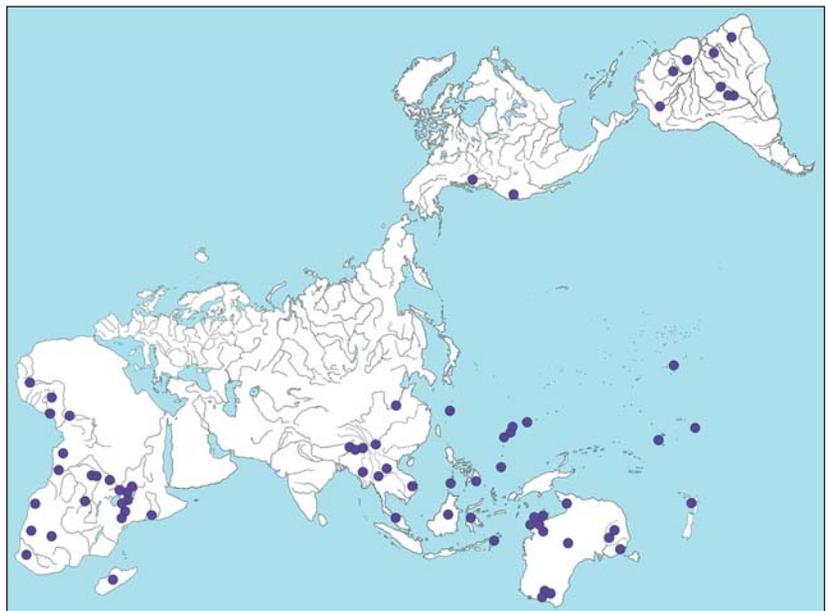
## Возрождающаяся луна и тонущие камни

В мифе народа нама, живущего на юге Африки и говорящего на одном из койсанских языков, рассказывается, что Луна послала зайца к людям с приказом: «Как я ежемесячно умираю и возрождаюсь, так и вы, умерев, должны возвращаться к жизни». Но заяц переиначил: «Как умирают зайцы и больше не возрождаются, так будут и люди». Луна в наказание порвала зайцу губу, а люди погнались за ним прочь и с тех пор не едят зайчатину.

А вот один из вариантов, записанных в западной Австралии у народа биббулум. Месяц сказал Сумчатому Коту, что люди будут возрождаться после смерти подобно ему, Месяцу. Кот не согласился и убежал. Тогда Месяц спросил Кенгуру, что станет после смерти. Кенгуру увивал от ответа, пока Месяц не стал его щекотать, а затем сказал, что люди будут умирать навсегда. Месяц ответил — пусть так, но он, Месяц, будет воскресать.

В Южной Америке мотив бессмертного Месяца часто сочетается с мотивом неслышанного приказа, который популярен также в Африке и Меланезии. Так, у колумбийских индейцев секоя Месяц перед тем, как подняться на небо, велел людям не спать, но те заснули и не услышали обращенного к ним призыва. На призыв Месяца ответили ящерицы и змеи и деревья, которые меняют кожу и возрождаются молодыми, а люди не меняют кожу и поэтому смертны.

Может показаться, что столь простая идея, как противопоставление людям Луны, которая «рождается», «старится», на три дня исчезает, а затем появляется вновь, могла легко возникать много-



Встречаемость мотива «Бессмертный Месяц». Луна (Месяц) противопоставлена людям как бессмертная смертным; выносит решение, быть ли людям смертными или жить вечно; обитатели луны бессмертны.

кратно. Но карты распространения мотивов доказывают: на большей части Евразии ничего подобного нет. Характерен миф таймырских долган, записанный П.И. Третьяковым полтора века назад. В нем рассказывается, как бедный мальчик обратился за помощью к Месяцу и тот его взял к себе. Бог сказал, что сотворил Месяц чистым и не велел касаться людей. Теперь же Месяц будет, подобно человеку, через четыре недели рождаться и умирать и так весь век маяться». До этого Месяц имел постоянно круглую форму и не исчезал. Тема та же, что в Африке и в Австралии, но ее трактовка иная.

Смена кожи и бессмертный Месяц — два самых популярных мотива, связывающих Африку южнее Сахары с индо-тихоокеанскими областями планеты, но есть и другие. Один из таких мотивов — «утонувший камень». Люди смертны, так как уподоблены брошенному в воду камню, который упустив возможность походить на органику, всплывает в воде. Подобный сюжет встречается в Африке, Австралии и в обеих Америках, но широко распространен только в Северной. Возможно, он был принесен с ранними волнами заселения Америки, но, в отличие от мотива смены кожи, на севере не был вытеснен более поздними миграциями. Несмотря на редкость, версии со всех континентов очень похожи и многие из них включают уже упомянутое противопоставление смертных людей бессмертной Луне. Вот несколько примеров.

*Фон* (Дагомея, Африка). Маву положил пустую калебасу на воду, сказав: «Как калебаса останется на воде, так и люди будут жить вечно». Паук бросил камень: «Как камень пошел на дно, так и люди

будут умирать навсегда». Мать Паука умерла, он стал просить Маву ее оживить и сделать людей бессмертными. Маву отказался. Если бы Паук не рассердил до этого Маву, люди бы оживали после смерти, как Месяц, который умирает каждое утро и возвращается вечером.

*Нунгабуррах* (Австралия). Месяц попросил людей перенести через реку его «собак» (это были змеи). Если люди сделают это, то будут возрождаться после смерти подобно тому, как кора всплывает в воде, а если откажутся, то станут умирать, как брошенный в воду камень. Месяцу пришлось перенести собак самому. Теперь люди не возрождаются и убивают змей, но Месяц посылает других.

*Сарси* (провинция Альберта в Канаде). Старик хотел, чтобы как щепки всплывают в воде, так и люди возрождались после смерти. Его жена отпустила, что тогда земля переполнится, пусть умирают насовсем. Старик стал Солнцем, его жена — Луной.

*Рамкокамекра* (Восточная Бразилия). Солнце предлагает, чтобы мертвые возрождались подобно всплывающему дереву. Месяц решает, что они будут умирать подобно идущему ко дну камню.

## Хронология мифотворчества

Для датировки фольклорно-мифологических мотивов кардинально важна их встречаемость в Новом Свете. Уже было сказано, что прямой перенос мифов из Африки в Америку практически исключен. Раз в Африке южнее Сахары представлен тот

же самый набор мотивов о происхождении смерти, что и в Америке, значит, эти мотивы были известны палеолитическим обитателям Восточной Азии, откуда начали свое продвижение первые мигранты в Новый Свет. Время заселения Нового Света известно, соответственно, мы получаем надежную хронологическую зацепку: 15—20 тыс. лет назад как минимум. Для определения максимальной древности американские материалы бесполезны, но тут на помощь приходят африканско-меланезийско-австралийские параллели. Теоретически допустимо, что такие мотивы распространились не из Африки в Азию, Океанию и Австралию, а в обратном направлении. Некоторые мотивы, отражающие неолитический уровень развития культуры, из Азии в Африку действительно проникали (это отдельная тема, ее мы сей-



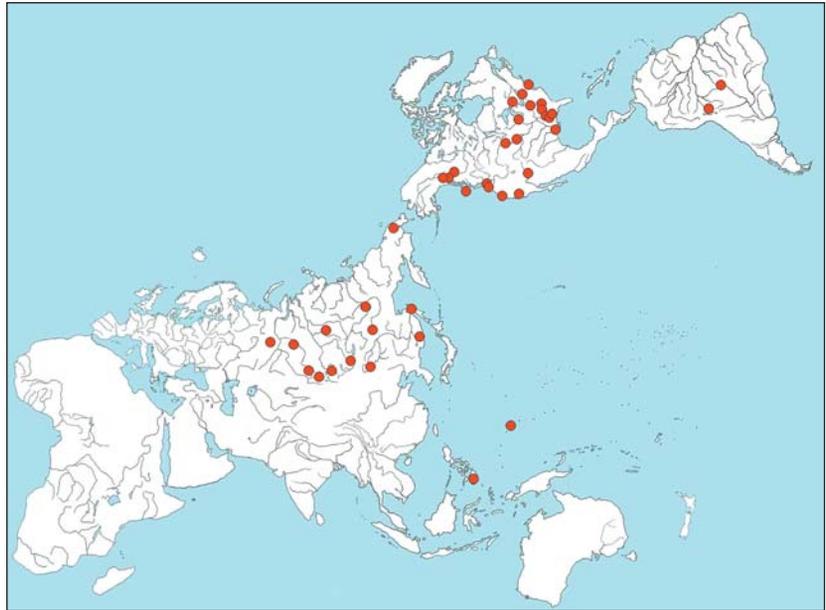
Мотив «Утонувший камень». Люди смертны, так как уподоблены брошенному в воду камню и упустив возможность походить на органику, которая всплывает в воде.

час не касаемся). Другие мотивы из Азии в разное время проникали либо в Африку, либо в Америку, как, например, рассказ о том, что небесный свод беспрестанно бьется о Землю, подобно крышке кипящего котла.

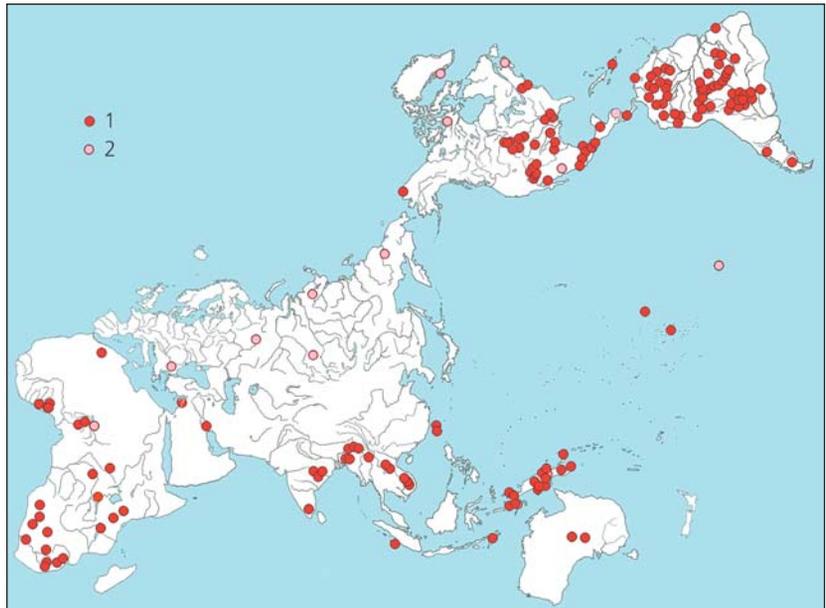
Однако мотивы о происхождении смерти образуют целый комплекс, кластер, представленный во всех трех регионах, ключевых для датировки возраста мотива: в Африке южнее Сахары, в индо-тихоокеанских областях Старого Света и в Америке. Помимо них, к этому комплексу принадлежат еще лишь два-три других. Так, в мифологиях именно данных областей планеты люди обычно не созданы божеством, а выходят из-под земли одни или вместе с животными. Совпадение с ареалом распространения «смертных» мотивов поразительно близкое.

Еще один вероятный мотив данного комплекса — представление о радуге как о змее. Изредка оно встречается и в Европе, но там представления о радуге отличны от африканских, австралийских и американских. Если для нас радуга ассоциируется с чем-то приятным и красивым, то африканцам или индейцам она, как правило, отвратительна. Считается, что радуга зловонна и приносит болезни. Кроме того, в Европе радуга связывается с представлением о змее в единичных случаях, гораздо популярнее другие ассоциации — с луком, поясом, куском цветной материи и др.

Африканские мотивы происхождения смерти явно занимают особое место в мировой мифологии. И так как ранняя миграция из Африки в Азию надежно доказывается генетикой, проще всего предположить, что распространение «смертных» мотивов было связано именно с ней. Поскольку время выхода людей современного типа из Африки известно, возраст интересующих нас мотивов может составлять 50—70 тыс. лет. Но каким образом сюжеты устных повествований могут быть более древними, чем языки, на которых их рассказывают?



Ареал распространения мотива «Небесный свод беспрестанно бьется о землю подобно крышке кипящего котла» позволяет определить, что он присутствовал в Азии до заселения Нового Света.



Встречаемость мотива «Люди из нижнего мира»: 1) первые люди не созданы демиургом, а выходят из-под земли или из небольшого объекта на ее поверхности (дерева, тростинки, камня, тыквы и пр.); выходящих людей много, либо люди выходят на землю вместе с животными; 2) первые люди выросли или выползли из земли как трава, грибы, черви и т.п.

За 10 тыс. лет язык меняется до неузнаваемости, и лингвисты, как правило, отказываются заниматься проблемами столь древнего языкового родства. И уж вовсе никто не предполагает, будто мы в состоянии обнаружить родство языков, общий пре-

док которых существовал 30 или 50 тыс. лет назад. Предположение, будто содержание текстов может быть значительно более древним, нежели языки, на которых они рассказываются, не все готовы принять. Наши данные показывают, что мифология и фольклор могут сохраняться при постепенной эволюции языка. Меняются лексика и грамматика, но мотивы — «кирпичики», из которых складываются повествования, сохраняются. Да и имеющиеся языковые границы оказываются вполне проницаемыми для мифов. Прозаические фольклорно-мифологические тексты вполне переводимы с одного языка на другой и потому легко заимствуются. Одинаковые сказки и мифы, имеющие специфические подробности, независимое появление которых маловероятно, распространены на огромных территориях у разных народов. И мы полагаем, что при глобальном анализе фольклорного материала и его сопоставлении с данными генетики и археологии можно обнаружить следы древних мифов и определить регионы и эпохи их возникновения.

### Что мы можем узнать о древних культурах, сравнивая современные мифы и предания?

Как ясно из предшествующего описания, чтобы высказать обоснованные суждения о возрасте мотивов, требуется, во-первых, определить ареалы их распространения по всему миру, а, во-вто-

рых, сравнить эти данные с оценками тех наук, которые способны определять абсолютный возраст изучаемых материалов — археологии, генетики, отчасти лингвистики. Какую новую информацию удалось получить, обращаясь к данным сравнительной мифологии и их сопоставлению с материалами генетики и археологии? Прежде всего, в нашем распоряжении впервые оказался конкретный довод в пользу того, что не менее 50—70 тыс. лет назад наши предки не только владели языком (в этом мало кто сомневался), но и рассказывали истории, не имеющие отношения к повседневности, т.е. обладали развитым образным мышлением. Тематика древнейших мифологических повествований тоже весьма интересна, хотя и не так удивительна. Конечность человеческой жизни волновала людей во все времена. Тому мы получили эмпирическое подтверждение в нашем исследовании. Никаким другим способом получить соответствующие данные было бы невозможно.

Мы не знаем, на каких языках говорили первые переселенцы из Африки, прошедшие по морским побережьям. Мы не можем реконструировать их картину мира по доступным археологическим свидетельствам. Но мы можем узнать, о чем говорили наши предки десятки тысяч лет назад и восстановить элементы их картины мира, используя материалы сравнительной мифологии в сочетании с данными, установленными другими науками. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект 14-18-03384.**

### Литература

1. *Frazer J.G.* The Golden Bough: a Study in Magic and Religion. 1890 (русский перевод: Золотая ветвь: исследование магии и религии. М., 2012).
2. *Березкин Ю.Е.* 2007. Происхождение смерти — древнейший миф // Этнографическое обозрение 1. С.70—89.
3. *Oppenheimer S.* Out-of-Africa, the peopling of continents and islands: tracing uniparental gene trees across the map. *Phil. Trans. R Soc. Lond B.* 2012.V.367. P.770—784. doi:10.1098/rstb.2011.0306.
4. *Underhill P.A., Kivisild T.* Use of y chromosome and mitochondrial DNA population structure in tracing human migrations. *Annu Rev. Genet.* 2007. V.41. P.539—564. doi:10.1146/annurev.genet.41.110306.130407.
5. *Березкин Ю.Е.* Африка, миграции, мифология. Ареалы распространения фольклорных мотивов в исторической перспективе. СПб., 2013.
6. *Васильев С.А., Березкин Ю.Е., Козинцев А.Г.* Сибирь и первые американцы. СПб., 2011.

# Научное творчество и возраст исследователя

В.Н. Холодов

**Р**оль возраста исследователя в его научной деятельности с давних времен оценивалась исходя из общих представлений о жизни среднестатистического человека. Наблюдения и опыт многих поколений людей позволили нарисовать в генетической памяти человечества два резко отличных друг от друга стереотипа — молодости и старости.

Согласно общераспространенному мнению, молодость, как правило, отличается физическим здоровьем, отсутствием страха смерти, избыточной энергией и подвижностью, яркостью жизненных впечатлений, свежестью мышления и цепкой памятью. Психологически молодежь полна надежд, веры в будущее, веселья, несгибаемого оптимизма и веры в свое бессмертие.

На протяжении долгой жизни человека все эти замечательные качества тускнеют и стираются. Стереотип старости великолепно описан И.И.Мечниковым: «...как человек, так и всякие животные с возрастом претерпевают существенные изменения. Силы ослабевают, тело горбится, волосы седеют, зубы изнашиваются. Одним словом, наступают явления старческой атрофии. В этом преклонном возрасте, начинающемся в различные сроки у разных видов животных, организм становится мало выносливым к вредным



**Владимир Николаевич Холодов**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Геологического института РАН. Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — геохимия осадочного процесса, литология, осадочные рудные месторождения. Главный редактор журнала «Литология и полезные ископаемые». Постоянный автор «Природы».

влияниям и гибнет от различных болезнетворных причин» [1, с.188]. Для пожилых людей характерны перерождение тканей организма, затруднение обмена веществ, склероз сосудов и ослабление умственных способностей.

Приговор творческой деятельности в старости вынесли и врачи-психологи. Так, М.Нордау еще в 1875 г., характеризуя среднестатистического старика, писал: «...умственно он — ослабленный и ограниченный мыслитель, по-существу сплетенный из старых ошибок и предрассудков и остающийся глухим для новых идей» [2].

Приведенные весьма распространенные и общепринятые стереотипы молодости и старости работами многих ученых были узаконены и мысленно легко перенесены в науку. Великий немецкий поэт, философ, ботаник, физиолог, химик и физикохимик, геолог и натуралист, гениальный И.В.Гете утверждал: «Надо быть молодым, чтобы создавать великие дела».

Один из пионеров науковедения немецкий физикохимик В.Ф.Оствальд, лауреат Нобелевской премии по химии в 1909 г., на основе чисто дедуктивного анализа высказал два постулата:

— для всех выдающихся ученых характерна ранняя творческая зрелость, подавляющее большинство крупных открытий было совершено в возрасте 23—28 лет;

— не отмечается постепенного увеличения творческих сил ученых на протяжении их научного пути, кривая интенсивности научного творчества падает с возрастом [3, 4].

Одно время проблема творчества и возраста считалась практически решенной, тем более что к постулатам Оствальда присоединились многие европейские и американские ученые. Так, например, американский психолог Г.Леман в своей очень полной монографии

сделал общий вывод, что больше половины открытий в области химии приходится на возраст 25—40 лет [5, 6].

## Исследования Вальдена

Оказалось, однако, что проблема соотношения возраста и творчества в науке не столь проста, как это выглядит на первый взгляд. Ученик Оствальда российский академик П.И.Вальден на большом фактическом материале, широко используя методы индукции, показал спорность постулатов своего учителя.

Пауль Иванович Вальден, профессор Рижского политехнического института, академик Российской Императорской Академии наук и почетный член Академии наук СССР, физикохимик, широко известный благодаря своим работам в области полимеризации нефти и электрохимии водных растворов, глубоко интересовался также историей химических исследований в России и за рубежом. Его перу принадлежат многочисленные статьи о трудах М.В.Ломоносова, Д.И.Менделеева, А.М.Бутлерова и многих других выдающихся химиков. Он создал книги, которые до сих пор остаются настольными для многих историков науки [7, 8]. Во второй части труда «Из истории химических открытий» Вальден попытался отыскать количественную связь между хронологией творчества ученого и его достижениями в науке [8].

Вопреки романтическим представлениям обывателя оказалось, что открытие в науке — не случайное озарение, которое сегодня посещает голову одного «гуляки праздного», а завтра другого. Чаще всего это многократно возвращающееся и совершенствующееся построение. Оно становится началом огромной, планомерной и многолетней работы или возникает как кульминация целого этапа исследования. Вспышка мысли здесь всегда соседствует с экспериментальной проверкой идеи в лаборатории или в природе и соединена с постоянным, глубоким и всесторонним обдумыванием проблемы\*. Открытие почти всегда органически вплетено в жизнь ученого.

Для исследования проблемы Вальден изучил научное творчество 126 ученых из различных областей естествознания, совершивших 228 больших и малых открытий. Все описанные им открытия и изобретения он разделил по значимости и направлению работ. В результате обособились семь групп научных достижений:

1) фундаментальные правила и законы современного естествознания (математика, физика, химия, астрономия, геология и география, биология, медицина и физиология человека);

2) законы физикохимии, характеризующие состояние и энергию материи;

3) открытие новых химических элементов таблицы Д.И.Менделеева;

4) электричество и атомарная физика;

5) физико-химические свойства растворов;

6) каталитические реакции;

7) синтез органических веществ.

Оценив возраст первооткрывателей в выделенных группах по литературным данным, Вальден счел возможным различать следующие возрастные интервалы: до 30 лет, 30—40 и после 40. В итоге была получена таблица 1. Ее рассмотрение приводит к несколько неожиданному выводу. Прежде всего обращает на себя внимание совсем небольшой вклад в науку «молодости» — только 5—27% открытий сделано исследователями в возрасте до 30 лет. Между тем ученые почтенного возраста — несомненные лидеры в этом своеобразном соревновании. Они создавали от 29 до 70% первоклассных работ.

Пожалуй, исключение из этой общей закономерности составляет синтез органических соединений, где количество открытий молодых и пожилых ученых примерно равны (27 и 29%). Вальден объясняет такое соотношение сложностью и привлекательностью задач синтеза. Можно, однако, предположить, что здесь особую роль сыграла мода — очень распространенная черта человеческого общества.

Действительно, вплоть до начала XIX в. в науке господствовал принцип И.Реди — «*omne vivum e vivo*» (живое от живого), и абиогенное происхождение органических соединений полностью отрицалось. Получение органического соединения (мочевина), выполненное Ф.Вёлером в 1828 г., произвело впечатление разорвавшейся бомбы. И огромное количество молодых, зрелых и пожилых химиков бросились создавать в лабораториях различные органические соединения, стирающие химические грани между живым и неживым веществом.

Любопытно, что весь XIX и начало XX в. ознаменовались множеством открытий в этой области: Н.Н.Зинин синтезировал анилин (1842); Х.Кольбе — уксусную и трехуксусную кислоту (1845); Х.Бертоле в лаборатории получил эфиры (1853), а позднее — метан (1856), бензол и ацетон (1882); А.М.Бутлеров синтезировал сахар (1861) и первый третичный спирт (1864); М.Конрад из неорганических соединений создал малоновый эфир (1880); а А.Байер в том же году — индиго. Весьма впечатляющими были работы Е.Фишера, получившего целый ряд сахаров (1884—1908) и синтезировавшего белковые полипептиды (1899—1906).

Таким образом, с моей точки зрения, именно огромное значение научной проблемы, поднятой Вёлером, и всеобщее увлечение ею могли полностью стереть границы между открытиями молодых и пожилых химиков и статистически приблизить их друг к другу.

\* С этой точки зрения рассказы о яблоке, упавшем на голову И.Ньютона и послужившем главной причиной разработки теории тяготения, — не очень хороший анекдот завистников.

Таблица 1

## Распределение изобретений и открытий в науке по возрастным категориям авторов [8]

Разделы наук	Число обобщенных случаев	Возраст исследователей		
		до 30 лет	30–40 лет	более 40 лет
1. Фундаментальные правила и законы современного естествознания (математики, физики, химии, астрономии, геологии и географии, биологии, медицины и физиологии человека)	50	7 (14%)	9 (18%)	34 (68%)
2. Законы физикохимии, характеризующие состояние и энергию материи	44	3 (7%)	19 (43%)	22 (50%)
3. Открытие новых химических элементов таблицы Д.И.Менделеева	35	3 (5%)	8 (25%)	24 (70%)
4. Электричество и атомарная физика	27	4 (15%)	5 (18%)	18 (67%)
5. Физикохимические свойства растворов	17	2 (12%)	7 (41%)	8 (47%)
6. Каталитические реакции	15	2 (13%)	4 (27%)	9 (60%)
7. Синтез органических веществ	41	11 (27%)	18 (44%)	12 (29%)

Вновь возвращаясь к анализу табл.1, следует также отметить, что, несмотря на отсутствие обратной статистической связи между возрастом и интенсивностью творчества ученых, Вальден справедливо подчеркнул весьма существенное методическое отличие в открытиях молодых и пожилых ученых.

Как это особенно хорошо видно на примере изобретений и открытий первой группы, молодые ученые обычно предпочитают дедуктивный метод. В их построениях почти всегда много догадок и интуиции, «игры ума» и математической логики. В отличие от них, ученые зрелого возраста отдают предпочтение методу индукции. Их научные выводы опираются на огромный фактический материал и обычно включают в себя большой опыт зрелого исследователя. Так, в жизни ученого на смену легкости умозаключений приходят опыт и мастерство естествоиспытателя, и вполне вероятно, что эти особенности компенсируют яркость и образность мышления молодости.

Выводы Вальдена, касающиеся связи творчества и возраста исследователей, сделаны с учетом главным образом наиболее выдающихся достиже-

ний научной элиты — талантливых и даже гениальных ученых в различных областях науки.

### Великие естествоиспытатели

Продолжив исторический анализ Вальдена, я попытался более подробно связать достижения (открытия, изобретения, разработку законов природы) ученых и их научные биографии. Результаты этих изысканий представлены в табл.2 и на рис.1, где сопоставлены даты жизни и время выхода 108 наиболее важных работ 17 крупнейших ученых мира, достижения которых лежат в различных областях естествознания. Обобщение всего этого материала позволяет сделать ряд интереснейших выводов.

Очень раннее творчество характерно для сравнительно небольшой группы ученых. В наиболее распространенном варианте начало научной деятельности соответствует 23–25 годам от роду.

К числу наиболее молодых первооткрывателей относятся великий математик К.Ф.Гаусс; математик и астроном П.С.Лаплас; математик, юрист

Таблица 2

## Важнейшие достижения ученых в области математики, физики, химии, биологии, медицины, и других разделов естествознания [8, с дополнениями]

Автор, годы жизни	Главные научные достижения	Возраст автора (годы)
И.Ньютон (1642–1727)	Основы дифференциального исчисления (1665) Analysis per equationes numero terminorum infinitas	22
	(Анализ с помощью уравнений с бесконечным числом членов, 1666–1669)	24–26
	Работа о разложении света (1676)	34
	De Motu (О движении, 1685)	43
	Основы теории всемирного тяготения (1687) Philosophiæ naturalis principia mathematica	44
	(Математические начала натуральной философии; в 3-х томах, 1686–1687)	44–45
	Optice (Оптика, 1704)	61
Arithmetica universalis sive de compositione arithmetica liber (Курс лекций «Универсальная арифметика»; в 2-х томах, 1707)	65	

Автор, годы жизни	Главные научные достижения	Возраст автора (годы)
Г.В.Лейбниц (1646–1716)	De Principie Individui (О принципе индивидуации, 1663)	17
	Дифференциальное исчисление (возможно, совместно с Ньютоном, 1665)	19
	De Aute Combinatoria (Искусство комбинаторики, 1666)	20
	Specimen difficultatis in jure (Трактат о праве, 1667)	21
	Новый метод максимумов и минимумов (1684)	38
	Système nouveau de la nature et de la communication des substances, aussi bien que de l'union qu'il y a entre l'âme et le corps (Новая система природы и общения между субстанциями, а также о связи, существующей между душой и телом, 1695)	49
	Nouveaux essais sur l'entendement humain par l'auteur du système de l'harmonie préétablie (Новые опыты о человеческом разуме, 1704)	58
	Essais de theodicee (Опыты теодицеи, 1710)	64
	Monadologie (Монадология, 1714)	68
Principes de la Nature et de la Grace, fondés en raison (Начала природы и благодати, основанные на разуме, 1714)	68	
П.С.Лаплас (1749–1827)	Письмо Ж.Л.Д'Аламберу с изложением взглядов на небесную механику (1767)	18
	Exposition du système du monde (Изложение системы мира, 1796)	47
	Mécanique céleste (Небесная механика; в 5-ти томах, 1799–1825)	50–76
Г.Л.Ф.Гельмгольц (1821–1892)	Théorie analytique des probabilités (Аналитическая теория вероятностей, 1812)	63
	Über die Erhaltung der Kraft (О сохранении энергии, 1847)	26
	Beschreibung eons Augenspiegels (Описание офтальмоскопа, 1851)	30
	Die Lehre von den Tonempfundungen (Учение о музыкальной гармонии, 1877)	56
Л.Пастер (1822–1895)	Wissenschaftliche Abhandlungen (Научные исследования, посвященные теории аномальной дисперсии и термодинамике, 1881–1883)	60–62
	Nouvel exemple de fermentation determine par des animalcules infusoires pouvant vivre sans gaz oxigene libre (Исследование микробов как возбудителей брожения, 1863)	41
	Etudes sur la vin, ses maladies ets. (Изучение процессов брожения вина, 1866)	44
	Etudes sur la maladie des vers a soie (Исследования болезней почв, 1870)	48
	Etude sur la bière (Заметки о бешенстве, 1876)	54
	Les microbes organisesm (Микробы, совместно с Шиндалем, 1878)	56
Ч.Р.Дарвин (1809–1882)	Sur les maladies curulentes et en partuculier sur la maladie appelee cholera des poules (Прививки, предупреждающие холеру, 1896)	74
	Voyage of naturalist round the world (Путешествие натуралиста вокруг света, 1845)	36
	Zoology and geology of the voyage of H.M.S. Beagle (Зоология и геология путешествия на «Бигле», в соавторстве с Р.Овеном, Дж.Ватернаузеном, Дж.Гаульдом и др., 1840–1848)	31–39
	Geological observation of volcanic islands (Геологическое описание вулканических островов, 1846)	37
	Geological observation of South America (Геологическое описание Южной Америки, 1846)	37
	Monograph on the Cirripedia (Монография об усоногих раках; в 4-х томах, 1851–1854)	42–45
	Monograph on the fossil Balanidae and Verrucidae of Great Britain (Монография о ископаемых Balanidae и Verrucidae Великобритании, 1854)	45
	On the origin of species by means of natural selection (Происхождение видов, 1859) (основная работа жизни)	50
	On the various contrivances by which British and foreign orchids save Fertilized (Флористические наблюдения над орхидеями, 1862)	63
Х.Пюйгенс (1629–1695)	The movements and habits of clumbing plants (Флористика и ботаника, 1985)	66
	De retiociniis in indo aleae (Первая обоснованная теория вероятности, 1656)	27
	Усовершенствование телескопа и открытие самого большого спутника Сатурна и определение его орбиты (1655)	26
	Разработка теории маятника и общих оснований теории света (1678)	49
Г.Галилей (1564–1642)	Traité de la lumière (Принцип волнообразного распространения света, 1690)	61
	Le operazioni del compreso geometrico (Пропорциональный циркуль, 1606)	42
	Sidereus nuncius (Звездный вестник, 1610)	46
	Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovonno (Законы движения падающих и плавающих в жидкости тел, 1610–1612)	46–48
	Histoire e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti (Письма о солнечных пятнах, 1613)	49
	Discorso della cometa di Maria Guiducci (Астрономические наблюдения Галилея, 1619)	55
	Il Saggiatore (Пробирных дел мастер, полемический трактат, направленный против теории о кометах священника-иезуита О.Грасси, 1623)	59
Discorso e dimonstrazioni matematiche (Беседы и математические доказательства двух новых наук, 1638)	74	

Автор, годы жизни	Главные научные достижения	Возраст автора (годы)
Ж.Л.Л.Бюффон (1707–1788)	Переводы «Static hale» и «Теория флоксий» Ньютона (1735, 1740)	28, 33
	Основание естественно-исторического музея в Париже (1739 ?)	32 (?)
	Histoire naturelle des animaux (Естественная история животных, в соавторстве с Л.Ж.М.Добантоном, 1749)	42
	Histoire naturelle (Эпохи природы; в 36-ти томах, 1749–1788)	42–81
Л.Гальвани (1737–1798)	Открытие гальванического электричества (1792)	55
К.Ф.Гаусс (1777–1855)	Разработка метода наименьших квадратов (1795–1798)	18–21
	Обоснование теории деления круга (основа для понимания комплексных чисел, 1796)	19
	Disquisitiones arithmeticae (Дискуссионная арифметика, 1801)	24
	Theoria motus corporum coelestium (Математические основы современной теоретической астрономии, 1809)	32
	Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae (Теория наименьших квадратов, 1823)	46
	Resultate aus den Beobachtungen des Magnitischen Vereins (Обоснование изобретения магнитного телеграфа, в соавторстве с В.Э.Вебером, 1838–1843)	61–66
	Atlas des erdmagnetismus (Атлас земного магнетизма, 1840)	63
Р.Ж.Гаюи, аббат (1743–1822)	Dioptrische intersuchungen (Оптические исследования, 1843)	66
	Essai sur la theorie et la structure du cristaux (Теория структуры кристаллов, 1784)	41
	Traite de mineralogie (Трактат о минералогии, 1801)	57
	Traite elementaire de physique (Трактат об элементарной физике, 1803)	59
	Traite des caracteres physique des pierres precieuses (Трактат об особенностях кристаллизации минералов, 1817)	74
Ю.Р.Майер (1814–1878)	Traite de cristallographie (Трактат о кристаллографии, 1822)	79
	Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur (Заметки о соотношении сил в неодушевленной природе, 1842) (Впервые был сформулирован закон сохранения энергии и расчеты механического эквивалента теплоты)	28
	Die organische Bewegung in Ihrem Zusammenhand mit dem Stoffwechsel (Органическое движение в зависимости от обмена веществ, 1845)	31
	Beiträge zur Dynamik des Himmels (Приложение к небесной механике, 1848)	34
	Bemerkungen über das mechanische Aquivalent der Wärme (Заметки о механическом эквиваленте тепла, 1851)	37
	Über das Fieber (Над лихорадкой, 1862)	48
	Naturwissenschaftliche Vorträge (Лекции по естествознанию, 1871)	51
Die Torricellische leere und über Auslosung (Торричеллиева пустота и ее характеристика, 1876) (Во всех последующих работах автор развивает главную идею первой работы)	62	
С.Карно (1796–1832)	Reflexions sur la puissance motrice du feu (Второй закон механической теории тепла, 1824)	28
С.А.Аррениус (1859–1927)	Теория электрической диссоциации (1887)	28
	Образование миров (1906)	47
	Курс теоретической электрохимии. Теория химии (1907)	48
	Иммунохимия (1907)	48
	Судьба звезд (1915)	56
А.Эйнштейн (1879–1955)	Исследование энергии света; Определение размеров атомов с помощью диффузии в жидких растворах; Исследования причины броуновского движения; Изменения электродвижущих сил в пространстве и времени (1902–1905)	23–25
	Принцип относительности — масса тела пропорциональна его энергии (1905–1923)	23–44
	Разработка понятия о квантах света (1905)	23
	О специальной и общей теории относительности (1923)	44
	The world as I see it (Мир как я его вижу, 1934)	55
	Сущность теории относительности (1935)	56
	Письмо к президенту США Рузвельту о необходимости ликвидации угрозы атомной атаки и разработки атомного проекта США (1939)	60
И.П.Павлов (1849–1936)	Центробежные нервы сердца (1883)	34
	Усиливающий нерв сердца (1892)	43
	Лекции о работе главных пищеварительных желез (1897)	48
	Естествознание и мозг (1910)	61
	Двадцатилетний опыт объективного изучения нервной деятельности (поведения) животных. Условные рефлексы (1923)	74
	Лекции о больших полушариях головного мозга (1927)	78

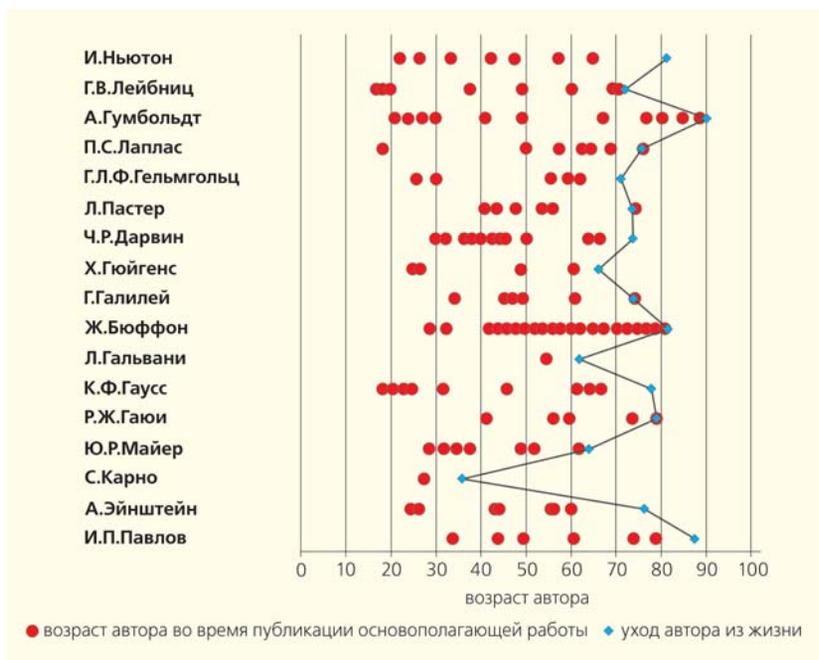


Рис.1. Творчество и возраст великих естествоиспытателей.

и философ Г.В.Лейбниц; геолог и географ А.Гумбольдт и величайший математик, физик и астроном И.Ньютон.

Карл Фридрих Гаусс в 18 лет, еще совсем юным студентом Гёттингенского университета (Германия), разработал и предложил метод наименьших квадратов, а год спустя обосновал теорию деления круга, послужившую основой для понимания комплексных чисел — одного из разделов современной алгебры.

Скромный 18-летний юноша Петр Симон Лаплас прибыл в Париж с рекомендательными письмами к «королю» французских философов Ж.Л.Д’Аламберу. Но его собственные разъяснения о небесной механике были столь глубоки и любопытны, что философ ответил: «Вы не нуждаетесь ни в какой рекомендации. Вы достаточно рекомендуете сами себя...». В 24 года Лапласа избрали во французскую Академию наук, а за свои труды он получил неофициальный титул «Ньютон Франции».

Готфрид Вильгельм Лейбниц в 15 лет поступил в университет, где изучал юриспруденцию и философию под руководством профессора Я.Томмазия. Позднее, благодаря лекциям профессора Э.Вейгеля, он увлекся математикой. В 18 лет (возможно, под влиянием Ньютона) он разработал основы дифференциального исчисления.

Великий Исаак Ньютон, будучи студентом Кембриджского университета, в 23 года разработал теорию флоксий (т.е. начала дифференциального исчисления) и теорию стекол. В его записных книжках того времени отражены увлечения работами Евклида и Декарта. Примерно тогда же он по-

лучил и степень бакалавра словесных наук. Работой «Analysis per equationes numero terminorum infinitorum» (табл.2), написанной в возрасте от 24 до 26 лет, Ньютон обратил на себя внимание всех выдающихся математиков Европы, а в 30 лет (в 1672 г.) он был избран членом Лондонского королевского общества.

Анализируя данные, приведенные в табл.2 и на рис.1, нетрудно прийти к выводу, что подавляющее большинство крупных ученых работали над интересующими их проблемами на протяжении всей своей жизни. В наиболее распространенном варианте это выразилось в периодическом появлении на свет научных шедевров, обычно тематически связанных друг с другом или взаимно дополняющих друг друга.

Однако в ряде случаев разрабатываемые проблемы отличались большим разнообразием и тематической контрастностью. Так, например, работы Ньютона посвящены философии, математике, физике света (дифракции и двупреломлению), астрономии и физике (теории тяготения). Труды Лейбница охватывали проблемы юриспруденции, математики и философии. Гаусс, наряду с проблемами математики, рассматривал основы теоретической астрономии, земного магнетизма, оптических законов света. Исследования гениального А.Эйнштейна касались энергии света, проблем времени, сущности электродвижущих сил, теории относительности и атомной энергии.

Особняком стоят Л.Гальвани и С.Карно (рис.1).

Итальянский врач, натуралист Луиджи Гальвани, исследуя физиологию лягушек, случайно натолкнулся на явление физиологического электричества. Описанный им гальванизм вошел в историю науки и получил блестящее продолжение в трудах А.Вольта, Я.Берцелиуса и других физико-химиков. Важность этого единственного открытия отмечена памятником Гальвани в г.Болонье (Италия).

Французский офицер, инженер Николай Леонард Сади Карно, изучая паровую машину, сделал вывод, что количество выполняемой ею работы прямо пропорционально падению температуры при переходе пара из котла в конденсатор. На этой основе позднее был сформулирован второй закон термодинамики. К сожалению, на 36-м году жизнь талантливого ученого оборвала эпидемия чумы.

Весьма условно на рисунке показаны многочисленные издания. Это в первую очередь касается трудов графа Жоржа Луи де Бюффона. Физик по-

специальности, он увлекся биологией и превратил возглавляемый им Королевский ботанический сад в Париже в крупный научно-исследовательский центр. Начатая им в 1742 г. (в соавторстве с Л.Ж.-М.Добантоном) монография «Эпохи природы» превратилась в 36-томное издание, написанное самим Бюффеном, а затем продолженное его учениками.

Не менее широко известно четырехтомное издание барона Гумбольдта «Космос», напечатанное в 1845—1858 гг. и представляющее собой результат его разносторонних наблюдений, которые охватывали географию и океанографию, метеорологию, минералогию и геологию, ботанику и зоологию разных континентов. Географический размах его путешествий впечатляет. Так, в течение 1790—1799 гг. Гумбольдт работал в Бельгии, Великобритании, Германии, Голландии, Испании, Франции и Швейцарии. В 1799—1804 гг. он совершил путешествие в Америку, где исследовал бассейн р.Ориноко и посетил Венесуэлу, Колумбию и Эквадор, а кроме того, Мексику и Кубу. В 1804—1819 гг. он работал в Германии, Италии и Франции. В 1829 г. по приглашению российского императора Николая I принял участие в экспедиции на Урал, в горы Алтая и в Джунгарию, а также на берега Каспийского моря. Его спутниками и сотрудниками были выдающиеся ученые: химик Ж.Л.Гей-Люссак, палеонтолог и геолог Ж.Кювье, натуралист П.А.Латрель и др.

В целом рис.1 однозначно подтверждает статистические выкладки академика Вальдена — творческие успехи выдающихся ученых практически не зависят от их возраста. Ошибка Оствальда и американских психологов заключалась в том, что они объясняли творчество крупных ученых мерками среднестатистического человека.

Между тем корифеи науки почти всегда отличались высоким интеллектом, феноменальной и тренированной памятью, знанием нескольких иностранных языков, увлеченностью научными проблемами (миром идей) и способностью сосредотачиваться на предметах своего увлечения (талантом «неотступных размышлений», по определению академика Н.М.Страхова), развитой фантазией и интуицией, умением вовлекать других ученых в круг своих интересов, удивительной работоспособностью и своеобразным честолюбием, которое заставляло при решении проблемы или достижении цели, подобно А.С.Пушкину, восклицать: «Ай да Пушкин! Ай да сукин сын!».

Как показал Вальден, развитие ученого, тем более талантливого первооткрывателя, существенно отличается от развития среднестатистического человека. В этом случае на смену смелости и красочности мышления молодости приходят опыт, зрелость мысли и широкий научный кругозор, овладение методологией и разнообразными методиками исследования, эрудиция и профессио-

нальные навыки. Вспышки мысли и талантливые догадки заменяются системными разработками, ставятся и решаются фундаментальные проблемы, обосновываются и формируются законы.

В целом очевидно, что старость не всегда служит помехой для научной деятельности. Известно, что 80-летний академик В.И.Вернадский в связи с ухудшением зрения писал: «Не могу видеть ни вблизи, ни вдаль. Но главное для ученого — мысль, работает очень хорошо». Он доказал это публикацией своей последней статьи «Несколько слов о ноосфере», поднимающей кардинальные вопросы развития жизни на Земле [9].

Как показал II Международный конгресс врачей «Экология мозга: искусство взаимодействия с окружающей средой», состоявшийся недавно на базе Первого Московского государственного медицинского университета им.И.М.Сеченова, мозг человека без нагрузки стареет быстрее и в большей степени подвергается склеротическим изменениям. Не вызывает сомнения, что систематическая умственная деятельность поддерживает хорошую работу головного мозга и отодвигает проявления старости и склероза.

## Выдающиеся геологи и географы

В предыдущем разделе статьи были детально рассмотрены взаимозависимость научного творчества и возраста ученых в области фундаментальных разделов науки. Возникает вопрос: в какой мере выводы, сделанные выше, можно распространять на группу естественных наук, таких, например, как геология и география.

Для решения этой проблемы были также составлены таблица и рисунок, в которых отражено творчество 14 крупнейших геологов и географов XIX и XX вв. Использовались датировки выхода в свет 150 монографических изданий, реже — принципиально важных журнальных публикаций (табл.3, рис.2).

Очевидно, что в общих чертах полученная картина мало отличается от приведенной выше. Первые научные достижения у работающих в области наук о Земле появляются на свет в возрасте 25—30 лет, но в зрелом (40—50) и преклонном возрасте (60—80 и даже около 90 лет) они совсем не исчезают, а в некоторых случаях даже усиливаются и охватывают все более широкие области науки. Таковы, например, обобщения Гумбольдта (в 76—89 лет он издает свой знаменитый «Космос») и океанологические построения Страхова (в 76—79 лет создавшего гидродинамическую концепцию океанского осадконакопления, завершающую его монументальную работу по типам литогенеза континентов Земли).

Нельзя также не вспомнить замечательные работы Ж.Ламарка — «Гидрогеологию», «Философию зоологии» и многотомную «Естественную

**Таблица 3**  
**Важнейшие работы и возраст крупнейших геологов и географов**

Автор, годы жизни	Название и время создания работы	Возраст автора (годы)
Ч.Ляйель (1797–1875)	Основные начала геологии (том 1, 1830)	33
	Основные начала геологии (том 2, 1832)	35
	Основные начала геологии (том 3, 1833)	36
	Путешествие в Северную Америку (1845)	48
	Второе посещение Соединенных Штатов в 1849 г. (1850)	53
	Древность человека (1863)	76
А.Гумбольдт (1769–1859)	Über die Basalte am Rhein, nebst untersuchungen über Sienit und Basanit der Alpen (О проблеме базальтов Рейна в связи с исследованиями сиенитов и базанитов Альп, 1790)	21
	Flora Subterranea Fribergensis et aphorismi ex physiologia chemica plantarum (Флора подземного фриберггенезиса как ключ к физиологии химизма растений, 1794)	24
	Über die chemische Zerlegung des Luftkreises (О проблеме химизма дыхания, 1799)	30
	Über die Unterirdischen Gasarten (О проблеме подземной атмосферы, 1799)	30
	Über die gereizte Muskel – und Nervenfasern nebst Vermutungen über den chemischen Process des Lebens in der Thier – und Pflanzenwelt (О проблеме предполагаемой работы мышц и нервов по сравнению с химическими процессами в жизни зверей и растений; в 2-х томах, 1707–1709)	27–30
	Voyage aux Regions equinoxiales du nouveau Continent: Fait en 1799–1804 (Путешествие на новые континенты. Шесть разделов, 1811–1829)	42–49
	Fragmente de Geologie et de climatologie asiatiques (Фрагменты геологии и климатологии Азии; в 2-х томах, 1832)	63
	Cosmos (Космос; в 4-х томах, 1845–1858)	76–89
Н.М.Страхов (1900–1979)	Последние страницы геологической истории Черного моря (1930)	30
	Геологическая история Черного моря (совместно с А.Д.Архангельским, 1932)	32
	Горючие сланцы зоны Perisphinctes Panderi d'Orb (очерк литологии, 1934)	34
	Битуминозные породы р.Юрюзань (очерки стратиграфии и литологии; совместно с С.С.Осиповым, 1935)	35
	Историческая геология (в 2-х томах, 1937–1938)	37–38
	Доманиковская фация Южного Урала (1939)	39
	Железорудные фации и их аналоги в истории Земли (1947)	47
	Очерки геологии кунгура Ишимбаевского нефтеносного района (1947)	47
	Известково-доломитовые фации современных и древних водоемов (1951)	51
	Образование осадков в современных водоемах (совместно с Н.Г.Бродской, Л.М.Князевой и др., 1954)	54
	К геохимии органического вещества (совместно с К.Ф.Родионовой, 1954)	54
	К геохимии нефтеносных отложений. Нижнефранкские породы Второго Баку (совместно с К.Ф.Родионовой, Э.С.Залмансон, 1955)	55
	Основы теории литогенеза (тома 1–2, 1960), (том 3, 1962)	60
	Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли (1963)	63
	Геохимия осадочного марганцерудного процесса (совместно с Л.Е.Штеренбергом, В.В.Калиненко, Е.С.Тихомировой, 1968)	68
	Развитие литогенетических идей в России и СССР (1971)	71
	Проблемы геохимии современного океанского литогенеза (1976)	76
Геохимия современного седиментогенеза (1979)	79	
Ж.Л.Р.Агассис (1807–1873)	Etudes sur les Glaciers (Этюд о ледниках, 1840)	33
	Recherches sur les poissons fossiles (Исследования ископаемых рыб, 1833–1842)	26–35
	Systeme glaciaire (Система ледников, 1847)	40
	Классификации современных и ископаемых животных с критикой Дарвина (1846–1869)	39–62
Ж.Б.Ламарк (1744–1829)	Сочинения по метрологии (1776)	32
	Flore Francaise (Флора Франции, 1778)	34
	Hidrogeologie (Гидрогеология, 1802)	58
	Philosophie Zoologique (Философия зоологии, 1809)	65
	Histoire Naturelle des Vegetaux (Естественная история растений, 1802–1820)	58–85
В.А.Обручев (1863–1955)	Курс петрографии (1905)	42
	Рудные месторождения (1928–1929)	65–66
	Полевая геология (в 2-х томах, 1930–1932)	67–69
	Геология Сибири (многотомник, 1934–1943)	71–80
	География Азии (многотомник, 1951–1952)	88–89

Автор, годы жизни	Главные научные достижения	Возраст автора (годы)
А.Д.Архангельский (1879–1940)	Палеоценовые отложения Саратовского Поволжья и их фауна (1904)	24
	Верхнемеловые отложения востока Европейской России (1912)	33
	Условия образования нефти на Северном Кавказе (совместно с В.В.Меннером, В.Е.Руженцевым и др., 1927)	48
	Фосфориты СССР (совместно с Я.В.Самойловым, А.В.Семихатовым и др., 1927)	48
	Геологическое строение СССР (1932)	53
	Краткий очерк геологической структуры и геологической истории СССР (совместно с Н.С.Шатским, В.В.Меннером и др., 1937)	58
	Геологическое строение и геологическая история СССР (1939)	60
Н.И.Андрусов (1861–1924)	Керченский известняк и его фауна (1890)	29
	Некоторые результаты экспедиции «Черноморца» (1892)	31
	Геотектоника Керченского полуострова (1893)	32
	Ископаемые и живущие Dreissensidae в Евразии (1897)	36
	Einige Worte über das Internationale Schwimmende Institut (Несколько слов о Международном плавающем институте, в соавторстве с Дж.Мерреем, Э.Зюсом и др., 1898)	37
	Материалы к познанию прикаспийского неогена (1902)	41
	Южнорусские неогеновые отложения. Сарматский ярус (1902)	41
	Геологические исследования на Таманском полуострове (1903)	42
	Материалы для геологии Закаспийской области (1905)	44
	Южнорусские неогеновые отложения. Меотис (1906)	45
	Следы полюдиновых пластов в южной России (1908)	47
	Ископаемые мшанковые рифы Керченского полуострова; Кавказский миоцен (1909)	48
	Босфор и Дарданеллы (1910)	49
	Апшеронский ярус (1923)	62
В.М.Севергин (1765–1826)	Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел (1798)	33
	Пробирное искусство или руководство к химическому испытанию металлических руд и других ископаемых тел (1801)	36
	Подробный словарь минералогический, содержащий в себе подробное разъяснение всех в минералогии употребительных слов и названий, также как в науке сей учиненные новейшие открытия (1807)	42
	Опыт минералогического землеописания Российского государства (1809)	44
	Словарь химический, содержащий в себе теорию и практику химии с приложением ее к естественной истории и искусствам сочинения Шарль-Луи-Кадета, обработанный на русском языке трудами Василия Севергина (1810–1813)	45–48
	Новая система минералов, основанная на наружных отличительных признаках (1816)	51
Р.И.Мурчисон (1792–1871)	A classification on the true position of the Culm deposits on the central portion of that county (Положение отложений Кульма в центральном районе графства, в соавторстве с А.Седжвиком, 1836)	44
	On the physical structure of Devonshire and geological relations of its old stratified deposits (О геологической структуре Девоншира и его связи с древними стратифицированными отложениями, в соавторстве с А.Седжвиком, 1837)	45
	The Silurian System (Силурийская система, 1838)	46
	Siluria (Силур, 1839)	47
	Supplementary remarks on the «Devonian» System of rocks (Дополнительные замечания о породах девонской системы, в соавторстве с А.Седжвиком); On the carboniferons and Devonian systems of Westphalia (О карбонатной и девонской системах Вестфалии, в соавторстве с А.Седжвиком) (1839)	47
	The geology of Russia in Europe and the Ural mountains (Геология Европейской России и Уральских гор, 1845)	53
	Geological atlas of Europe (Геологический атлас Европы, 1856)	64
Е.С.Федоров (1853–1919)	Этюды по аналитической кристаллографии. Начало учения о фигурах (1885)	32
	Основные формулы аналитической геометрии в улучшенном виде (1888)	35
	Опыт вывода явления сдвига кристаллов по теории их структуры (1890)	37
	Теодолитный метод в минералогии и петрографии (1893)	40
	Теория структуры кристаллов (1894–1905)	41–52
	Универсальный метод и изучение полевых шпатов (1896, 1898)	43, 45
	Курс кристаллографии (1891–1910)	38–57
Новая геометрия как основа черчения (1907)	54	

Автор, годы жизни	Главные научные достижения	Возраст автора (годы)
А.Г.Вернер (1749–1817)	О внешних признаках ископаемых тел (1774)	25
	Опыт минералогии Акселя Кронштадта (1780)	31
	Краткая классификация и описание различных горных пород (1786)	37
	Сообщение Вернера об его открытии, сделанном на Шейбенбергском холме относительно происхождения базальта, дополненное двумя полемическими статьями (1788)	39
	Новая теория происхождения жил с ее приложением к горной промышленности, особенно Фрейбергской (1791)	42
	Подробное и систематическое описание минералогического кабинета бывшего горного начальника Саксонского княжества господина Евгения Пабст-фон-Огайн (1792)	43
	Таблица внешних признаков минералов (1804)	55
	Последняя система минералов (1817)	68
В.И.Вернадский (1863–1945)	О физических свойствах изоморфных смесей (1885)	22
	О группе силлиманита и роли глинозема в силикатах (1891)	28
	Явление скольжения кристаллического вещества (1897)	34
	Слюдяное кольцо (1899–1901)	36–38
	Опыт описательной минералогии (1908–1922)	45–59
	О парагенезе химических элементов (1910)	47
	История Академии наук в первые годы ее существования (1916)	53
	Начало и вечность жизни (1922)	59
	Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры (1922)	59
	История минералов земной коры (тома 2–3, 1923–1936)	60–73
	Геохимия (1924)	61
	Изотопы и живое вещество (1926)	63
	Очерки геохимии (1927)	64
Биосфера (1929–1931)	66–68	
	Химический состав биосферы Земли и ее окружения (1937–1940)	74–77
Я.В.Самойлов (1870–1926)	Материалы к кристаллохимии барита (1902)	32
	Минералогия жильного проявления Нагольного кряжа (1907)	37
	К минералогии фосфоритовых месторождений (1910–1915)	40–45
	Месторождения фосфоритов Алжира и Туниса (1912)	42
	Paleophysiology the origine of some minerals in sedimentary rocks (Палеофизиология происхождения некоторых минералов осадочных пород, 1918)	48
	Очерки работы в области изучения осадочных пород (1923)	53
	Отложения кремнезема осадочного происхождения (1925)	55
	К литологии карбонатных осадочных пород (совместно с Л.В.Пустоваловым, 1926)	56
	Минералогические очерки (1933, посмертно)	32

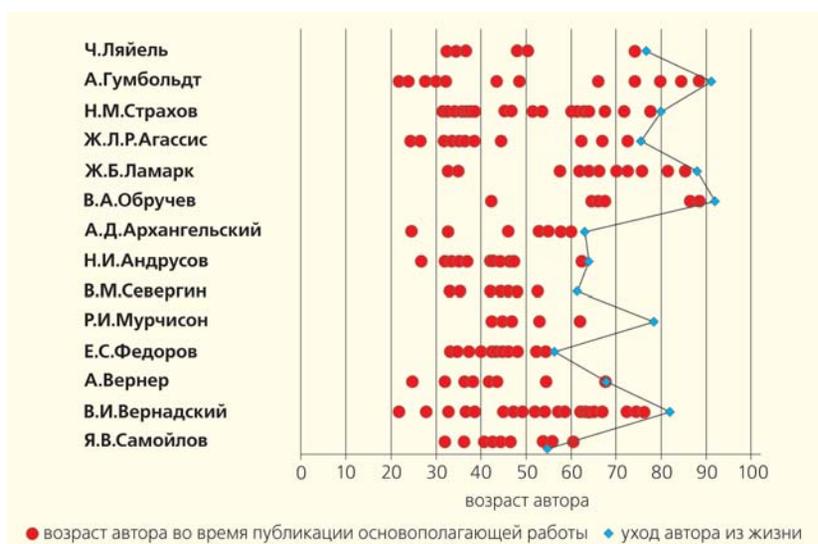


Рис.2. Творчество и возраст крупнейших геологов и географов.

историю беспозвоночных животных», опубликованные в возрасте 58–85 лет; многотомные и монументальные описания геологии Сибири и Азии, написанные академиком В.А.Обручевым на закате его удивительно плодотворной жизни (71–89 лет); «Геологический атлас Европы», созданный Р.И.Мурчисоном в 63 года; «Последнюю систему минералогии» А.Вернера, выполненную в 68 лет, и целый фейерверк работ В.И.Вернадского, охватывающий проблемы минералогии, геохимии, строения биосферы и историю минералов земной коры, созданные после 60 лет и издававшиеся после его ухода из жизни в 1946 г.

При рассмотрении графиков рис.2 обращают на себя внимание длительные перерывы в творчестве геологов и географов. Они чаще всего связаны со сбором первичного материала, с длительными путешествиями и командировками. Особенно типичны такие «лакуны» в работах Ж.Л.Р.Агассиса, Н.И.Андрусова, А.Гумбольдта, А.Вернера, Р.И.Мурчисона и В.А.Обручева.

В этом отношении особенно интересна научная жизнь академика Обручева, творчество которого на рисунке отражено крайне фрагментарно — там учтены только его крупные, обобщающие геологические работы. Между тем Владимир Афанасьевич опубликовал более 1000 работ. Среди них монографии, журнальные статьи, очерки, учебники и даже художественные произведения.

Его полевые работы начались в возрасте 25 лет, когда он принял участие в строительстве Закаспийских железных дорог в пустынях Средней Азии. Тридцатилетним начальником экспедиции по поручению Русского географического общества Обручев провел полевые исследования в Восточной и Центральной Монголии, в Китае, Ордосе, охватив также Наньшань, Алашань и Восточный Алтай. Его маршруты в то время измерялись величиной в 13 625 км азиатских дорог. Позднее, уже с длительными перерывами, исследования ученого

охватили многие слабо изученные районы Центральной Азии, Западной и Восточной Сибири, Джунгарии, Забайкалья, а также Крым и Кавказ.

\* \* \*

Подводя итоги всему сказанному, хотелось бы подчеркнуть, что все современные попытки выделить дееспособность ученых по возрастному признаку не соответствуют природе науки. Столь же бессмысленными представляются стремления отбирать будущих научных сотрудников и по национальному, классовому или экономическому критерию. Лозунг: «Не умеешь — научим, не хочешь — заставим!» применим в любой области народного хозяйства, но не в научных исследованиях.

Руководством к научно-организационной деятельности могут служить слова знаменитого английского физика-экспериментатора Э.Резерфорда: «Не возрастом, а творческим эффектом определяется достоинство исследователя. При этом не может быть проведена резкой границы между исследованиями в области чистой и прикладной науки, обе они одинаково важны для прогресса. Мы должны понять, что без цветущих центров исследования по основным вопросам, либо в университетах, либо в других научных заведениях, технический прогресс в конце концов прекратится». ■

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-05-00246.**

## Литература

1. Мечников И.И. Этюды о природе человека. М., 1961.
2. Нордау М. Психологические парадоксы. СПб., 1875.
3. Ostwald W. Grosse Männer. Leipzig, 1909.
4. Оствальд В. Великие люди. СПб., 1910.
5. Lehman H.C. Age and achievement. NY., 1953.
6. Леман Г. Проблемы научного творчества в современной психологии. М., 1971.
7. Вальден П.И. Очерк истории химии в России // Ладенбург А. Лекции по истории развития химии от Лавуазье до нашего времени. Одесса, 1917.
8. Вальден П.И. Из истории химических открытий. Л., 1925.
9. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере // Успехи биологии. 1944. Вып.2. С.113—130.

# Метаногенный карбонат со дна Карского моря

Г.Н. Батурин,

*доктор геолого-минералогических наук  
Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН*

В.Т. Дубинчук,

*доктор геолого-минералогических наук  
Всероссийский институт минерального сырья им.Н.М.Федоровского  
Москва*

Научные сообщения

Биогенные карбонатные осадки на дне широко распространены в тропической и субтропической зонах [1]. Однако известковая фауна и микрофауна существует и в полярных бассейнах, хотя доля биогенного карбонатного компонента в их донных отложениях невелика из-за коррозионного воздействия холодной морской воды, обогащенной углекислотой.

Вместе с тем на дне арктических морей известны находки и хемогенных карбонатов. Так, в одном из минералогических словарей [2] упомянут минерал икаит состава  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , впервые обнаруженный в гренландском Ика-фиорде в виде известково-ледяных столбов высотой 2–3 м и толщиной до 30 см. Эти образования сформировались, как предполагалось, при температуре не выше  $-3^\circ\text{C}$  и распались при более высокой температуре.

В осадках российских арктических морей океанологи и морские геологи также неоднократно находили предположительно абиогенный карбонатный материал, который, к сожалению, не удавалось сохранить.

Но в недавней работе А.Ю.Лейн с соавторами, посвященной исследованиям в Карском море, были описаны карбонатные включения разнообразной формы размером до нескольких сантиметров в поперечнике. Детальный анализ твердой, жидкой и газообразной фаз донных отложений показал, что найденные карбонаты — производные метана, который образуется в обогащенных органическим веществом осадках арктических морей [3].

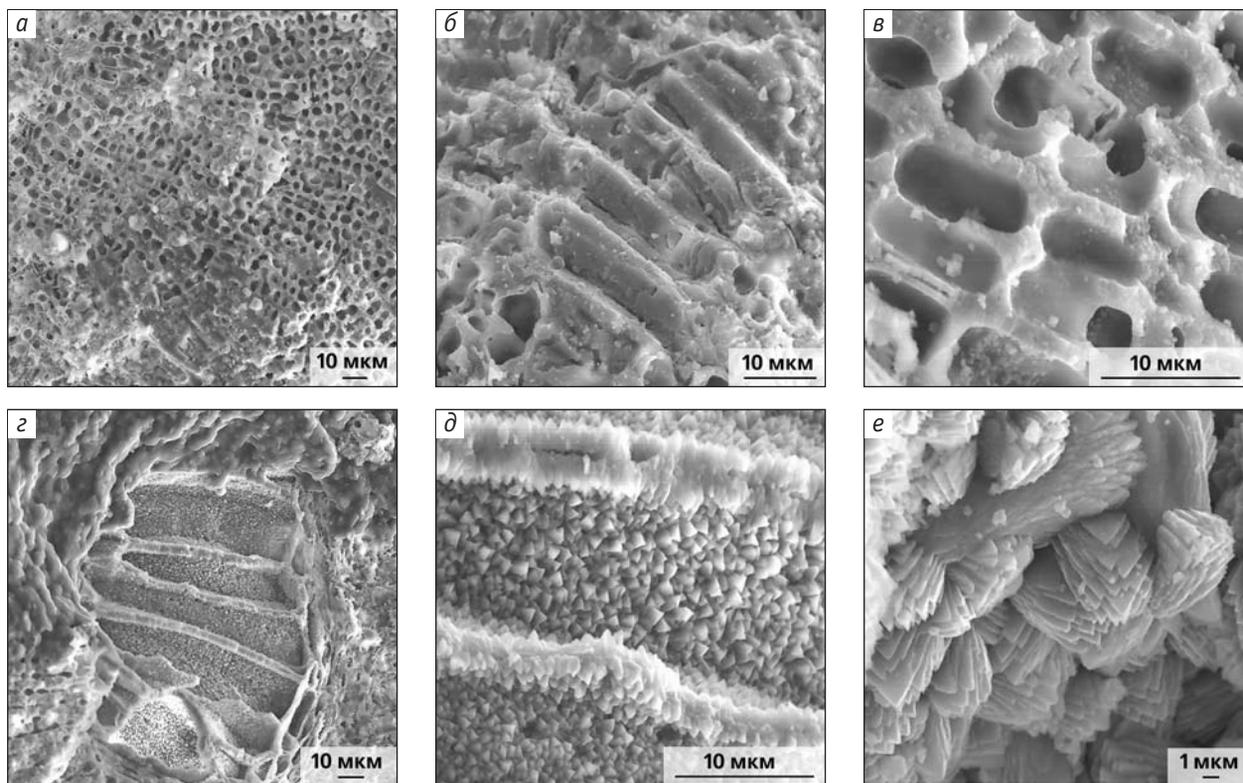
Вскоре появилось краткое сообщение о находке на дне Чукотского моря двух карбонатных глыб размером до  $30 \times 22 \times 18$  см. Изотопный состав и карбонатного углерода, и кислорода в образцах из этих глыб оказался облегченным:  $^{13}\text{C} = -63\%$  и  $^{18}\text{O} = 3.7\%$  [4]. Первая величина указывает на метановый источник углерода, а вторая говорит о том, что температура среды при формировании карбоната была положительной.



Фрагменты карбонатной глыбы, поднятой со дна Карского моря в экспедиции 2013 г.

Почти одновременно с этим, в 2013 г., в 125-м рейсе НИС «Профессор Штокман» (экспедиция Института океанологии им.П.П.Ширшова) при выполнении траловых работ со дна Карского моря подняли плотную белую глыбу размером  $18 \times 15 \times 12$  см и весом около 2.5 кг. Поверхность глыбы местами была гладкой, а местами — кавернозной, испещренной многочисленными отверстиями, которые проделали черви-камнеточцы. На белом фоне образца выделялись мелкие коричневые и темно-серые плотные включения, а также рыхлый материал, заполняющий каверны.

При исследовании фрагментов глыбы под электронным микроскопом мы установили, что она состоит из плотной смеси сцементированных корродированных фораминифер и обломков другой известковой микрофауны с ярко выраженной ячеистой структурой. Некоторые ячейки оставались пустыми, другие были заполнены агрегатами карбонатных тетраэдрических и пластинчатых микрокристаллов.



Микрофотографии карбоната из Карского моря: *a—в* — различные типы ячеистой структуры; *г—д* — микрокристаллы кальцита внутри ячеек и на перегородках; *е* — пластинчатые кристаллы кальцита в основной массе.

Химический состав средней пробы определялся в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (ИПТМ РАН) методом индуктивно связанной плазмы с масс-спектроскопией (ИСП-МС). Анализ пока-

зал, что наш образец по сравнению с составом карбонатных пород [5] обогащен кальцием, магнием, калием и серой (табл.1), а также восемью микроэлементами: стронцием (в 5 раз), цинком и серебром (в 9 раз), ртутью (в 4 раза), таллием (в 3 раза), свинцом, мышьяком и танталом (примерно в два раза) (табл.2).

Интересным оказалось поведение в карском карбонате 14 редкоземельных элементов (РЗЭ). Их

**Таблица 1**

**Химический состав карбонатных пород и метаногенных карбонатов (%)**

Компонент	Карбонатные породы [5]	Метаногенные карбонаты	
		Карское море	Чукотское море [4]
CaO	38.4	49.0	41.16
MgO	0.53	3.2	3.28
K <sub>2</sub> O	0.35	0.69	<b>0.80</b>
Na <sub>2</sub> O	0.44	0.05	<b>0.77</b>
SiO <sub>2</sub>	12.55	—	<b>21.41</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.23	0.13	<b>4.29</b>
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.06	<b>0.18</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.56	0.11	1.96
MnO	<b>0.29</b>	0.06	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.07	0.11
S <sub>общ</sub>	0.25	0.35	—
CO <sub>2</sub>	36.2 <sub>общ</sub>	—	28.6
C <sub>орг</sub>	—	—	0.81

Примечание. Здесь и далее анализы выполнялись под руководством В.К.Карандашева в ИПТМ РАН. Прочерк — нет определений.

**Таблица 2**

**Микроэлементный состав карбонатных пород и метаногенных карбонатов (г/т)**

Элемент	Карбонатные породы [5]	Метаногенные карбонаты	
		Карское море	Чукотское море [4]
Hg	0.03	<b>0.11</b>	—
Ag	0.05	<b>0.40</b>	—
Bi	0.05	<b>0.06</b>	—
Tl	0.06	<b>0.20</b>	—
Sn	1.6	0.08	<b>16</b>
Zn	5	<b>48</b>	21
Co	5.1	3.2	5
Pb	7	<b>14.2</b>	4
Ni	19	3.3	10
Cu	21	<0.3	<b>189</b>
Sr	380	<b>2180</b>	1194
Ba	360	<b>405</b>	197

Таблица 3

Содержание редкоземельных элементов в карбонатных породах, в карбонатной глыбе из Карского моря и в фораминиферах (г/т)

Элемент	Карбонатные породы [5]	Карбонатная глыба из Карского моря	Фораминиферы	
			Тихого океана [6]	Атлантического океана [7]
La	7	1.3	1.28	0.64
Ce	12	1.1	0.355	0.47
Pr	2.6	0.28	—	—
Nd	6.6	1.0	1.00	0.58
Sm	1.9	0.26	0.20	0.11
Eu	0.5	0.07	0.06	0.03
Gd	1.5	0.30	0.29	0.14
Tb	0.38	0.045	—	—
Dy	2.9	0.26	0.33	0.14
Ho	0.35	0.06	—	—
Er	0.75	0.17	0.27	0.10
Tm	0.14	0.02	—	—
Yb	0.9	0.12	0.28	0.10
Lu	0.11	0.02	—	—
ΣTR	37.63	5.00	4.86	2.31
Ce*	0.59	0.40	0.14	0.34
Eu*	1.27	1.04	0.67	1.04

Примечание. ΣTR — сумма редкоземельных элементов, Ce\* и Eu\* — величины цериевой и европиевой аномалии соответственно.

суммарное содержание равно 4.86—4.99 г/т, а в карбонатных породах оно составляет 37.6 г/т (табл.3). По содержанию и распределению они почти идентичны РЗЭ в современных фораминиферах из Тихого [6] и Атлантического [7] океанов.

Эта информация позволяет предположить механизм формирования подобных карбонатных глыб. Из осадочной толщи теплый метан диффундирует в верхний слой осадка и в морскую воду, что приводит к образованию бактериальных матов в месте его выхода. В верхнем слое осадка близ границы раздела вода—дно происходит бактериальный процесс трансформации метана в углекислоту, которая утилизируется колонией донных фораминифер. При длительном течении этого процесса на дне формируются карбонатные сооружения, заселенные разнообразной фауной, как созидающей их, так и разрушающей.

Для более надежного обоснования генезиса карбоната из Карского моря необходимо, как нам представляется, установить абсолютный возраст образца, получить данные по изотопному составу углерода и кислорода из разных фрагментов, определить видовой состав и возраст микрофауны и провести метановый мониторинг придонных вод в северо-восточной части Карского моря, где была обнаружена данная карбонатная глыба.

Пока же можно констатировать, что на дне Карского моря (как и Чукотского) встречаются плотные образования метаногенного карбоната дискуссионного происхождения. Их состав отличается по ряду геохимических параметров от среднего состава осадочных пород, но близок к составу фораминифер современного Мирового океана. ■

## Литература

1. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М., 1978.
2. Штрюбель Г., Циммер З.Х. Минералогический словарь. М., 1986.
3. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. // Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т.53. №5. С.643—679.
4. Колесник О.Н., Колесник А.Н., Покровский Б.Г. О находке аутигенного метанопродуктивного карбоната в Чукотском море // ДАН. 2014. Т.458. №3. С.330—332.
5. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. №7. С.785—792.
6. Elderfield E., Hawkesworth C.J., Greaves S.J., Calvert S.E. Rare earth elements in ferromanganese nodules and associated sediments // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1981. V.45. P.513—538.
7. Palmer R.R. Rare earth elements in foraminifera tests // Earth and Planet. Sci. Lett. 1985. V.73. P.285—298.

# Город древних земледельцев в Северо-Западной Монголии

Т.Н.Прудникова,

кандидат географических наук

Убсунурский международный центр биосферных исследований

Республики Тыва и Сибирского отделения РАН

Кызыл

Центральная Азия с ее степными, сухостепными и пустынными ландшафтами воспринимается нами в первую очередь как территория традиционного кочевого скотоводства. Здесь на необозримых степных просторах сформировалась и развивалась цивилизация древних кочевников. Тем не менее, по результатам дистанционных исследований установлено, что на обширных пространствах Центральной Азии — на территории Тувы, Хакасии, Алтая, Монголии — в прошлом было широко развито орошаемое земледелие.

## Изучение аэро- и космоснимков

Дешифрирование материалов аэрофотосъемки территории Тувы, произведенной в середине XX в., выявило сети обширных оросительных систем — следы саевого земледелия (основанного на использовании для орошения полей русел перемежающихся потоков, превращаемых в каналы) на субэриальных дельтах, простые и веерные системы орошения на пролювиальных шлейфах, в речных долинах [1]. Последующее исследование истории древнего земледелия позволило предположить, что на ранних этапах развития степной цивилизации земледелие играло значимую роль в экономическом укладе.

По аналогии с древней Тувой существование орошаемого земледелия предполагалось и на территории соседней Монголии [2]. Учитывая общность исторического развития, следы древнего орошения должны были присутствовать в сопредельной Монголии на аналогичных с Тувой ландшафтах — на пролювиальных склонах хребтов Танну-Ола, Хан-Хухея и на суба-

эриальных дельтах на северо-западе Убсунурской котловины. Дистанционные методы подтвердили это предположение и позволили обнаружить следы древнего земледелия как на горных склонах, так и на обширных опустыненных равнинах Убсунурской котловины, в долинах рек, а также на участках небольших оазисов среди бугристо-рядовых эоловых ландшафтов.

Убсунурская котловина, в настоящее время сухая, с огромными массивами развеянных песков и минимальным количеством годовых осадков, в прошлом активно использовалась под земледелие. Системы оросительных каналов и полей были обнаружены в верховье р.Нарийны-Гол, в междуречье рек Тес-Хем и Нарийны-Гол в центральной части котловины. Здесь же удалось распознать небольшие оазисы со следами орошаемых полей на участках выхода грунтовых вод среди эолово-дюнных ландшафтов [3]. При изучении космических снимков были идентифицированы многочисленные оросительные системы в широкой долине Тес-Хема, где на выходе в озерную котловину река рас-



Сопредельные территории России и Монголии на космическом снимке. Убсунурская котловина в Монголии.



Убсунурская котловина и самое ее сердце, оз.Убсу-Нур.

падает на многочисленные рукава, русла, протоки, образует бесчисленные меандры и излучины. Там же наблюдались следы множества построек, образующих целые поселения, которые тяготели к оросительным системам. Выявилась настоящая речная земледельческая цивилизация. Постройки имеют удлиненно прямоугольные и квадратные очертания. Это позволяет предположить, что их создателями не были кочевниками, ведь главное жилище кочевника — круглая юрта [4].

Западная оконечность Убсунурской котловины также была гигантским орошаемым полем, аналогичным Хемчикской котловине на западе Тувы. На обширных пролювиальных шлейфах, на пустынной плоской приозерной равнине — везде в большей или меньшей степени присутствуют оросительные системы, встречаются остатки приуроченных к ним заброшенных поселений. Древние системы оросительных каналов и полей были также обнаружены на склонах хребта Хан-Ху-



Следы ирригационных систем в долине р.Тес-Хем, выявленные на космическом снимке.



Сети оросительных систем, следы сооружений в долине р.Тес-Хем, выявленные на космическом снимке.

хий — южного горного обрамления Убсунурской котловины и у его подножья в долине р.Дзун-Гоби.

В настоящее время древние орошаемые площади — это преимущественно сухие степные и полупустынные ландшафты, используемые под пастбища. Оросительные каналы заброшены и занесены наносами. Проживающее на этой территории население занимается кочевым скотоводством. Пустынные ландшафты с перевейными песками и минимальное количество годовых осадков не способствуют развитию земледелия в наши дни. В прошлом же здесь были цветущие орошаемые поля. Масштабы ирригационных систем поражают своими размерами.

На конечных разливах р.Хойт-Хендлен-Гол, впадающей в оз.Убсу-Нур в западной его части, при выходе реки в озерную котловину, с помощью дистанционных исследований был обнаружен заброшенный город, по очертаниям и размерам напоминающий средневековые городища Тувы.

Городище прямоугольной формы длинной стороной ориентировано в северо-северо-восточном направлении. Размеры его около 215×155 м. В южной части городища отчетливо наблюдаются остатки сооружений. Городские ворота выражены не явно. С западной и южной сторон к стенам городища подходит система оросительных каналов. По результатам дешифрирования космических снимков создается впечатление, что город был построен на полях с уже существующими ирригационными системами (т.е. каналы древнее города). После сооружения крепостных стен первоначальные разветвленные русла каналов в пределах города были откорректированы, направление их русел изменено. Одно из таких русел опоясывает с внешней стороны западную и северную стены городища (возможно, образуя оборонительный ров). Другое для каких-то целей было подведено к внутреннему сооружению в южной части города.

Летом 2013 г. при поддержке гранта Русского географического общества состоялась монгольско-российская экспедиция по исследованию исчезнувших земледельческих цивилизаций Центральной Азии. Увиденный на космических снимках город был найден.

## Найденный город

Городище обнесено светлыми глинобитными стенами, высота которых достигает в настоящее время около 1.0 м. В глинистом материале, использовавшемся при строительстве стен, присут-



Очертания древнего городища на космическом снимке.

ствует большая доля песка, гравия и щебня. Мощность крепостных стен около 3 м.

В южной части города располагаются довольно хорошо сохранившиеся остатки сооружений квадратной и прямоугольной формы. Стены сооружений сложены светлым, необожженным (сырцовым) кирпичом. Параметры кирпичей соответствуют в среднем размеру 30×20 см. К стенам основных сооружений примыкают ячейки небольших помещений. Для армирования кладки сооружений или для иных целей использовались стебли тростника, ветви деревьев. В кирпичных кладках часто наблюдаются прослойки из травы и соломы, в отдельных местах сохранились элементы штукатурки. Встречаются обожженные стволы деревьев, служившие опорами для каких-



Прямоугольные ячейки внутренних помещений древнего городища.

Здесь и далее фото автора



Развалины древнего городища.



Стены сооружений сложены сырцовым кирпичом.



Мельничный жернов, вытесанный из гранита.

то конструкций, а также прямоугольные отверстия (30×40 см) от выгоревших или уничтоженных опор.

В северной части города сооружения полностью разрушены, сохранились лишь сплошные глинистые массы с редкими обломками сырцовых кирпичей (возможно, это более древние сооружения, например относящиеся ко времени постройки каналов).

В юго-западной части в город заходит канал, русло которого и бортовые валы очень хорошо сохранились. Канал, меняя свое направление на 90°, подведен к некому внутреннему сооружению, выходя за пределы которого, он разветвляется в центральной части города и уходит за его пределы в северо-восточном секторе.

Город горел, на некоторых участках наблюдаются следы пожара. В таких местах глина и кирпичи приобрели красноватый оттенок, травянистые прослойки выгорели, присутствуют обильные зольные образования.

Древний город оказался поселением древних земледельцев. В юго-восточной его части были обнаружены целый мельничный жернов и предположительно элементы каменных конструкций мельницы. Диаметр жернова — около 2 м. Рядом с ним найден небольшой обломок второго жернова с проточенными бороздами. Жернова, так же как и остальные (предполагаемые) детали мельницы, вытесаны из красного и белого среднезернистого гранита. Можно допустить, что в районе города или в непосредственной его близости находилась водяная мельница. В месте впадения канала, выходящего из города, в русле протекающей за стенами городища реки сохранилось небольшое озеровидное расширение. Возможно, именно там и находилась мельничная плотина.

Город существовал длительное время, переживая эпохи запустения. Крепостная стена в какой-то период времени начала разрушаться, на крепостном валу успел сформироваться почвенно-растительный слой мощностью около 10 см. Затем стена была надстроена, поверх погребенного почвенного слоя сохранилась глиняная надстройка мощностью около 60 см.

За пределами крепостных стен на прилегающей к городу территории наблюдаются крупные и мелкие скопления глинистого материала, сохраняющие в целом правильные геометрические формы. Возможно, это также остатки сооружений (например, жилищ рядовых земледельцев и др.). Такие же скопления глинистого материала с гра-

вием и щебнем обнаружены в долине р.Тес-Хем. Они тяготеют к оросительным каналам и часто сохраняют первоначальные прямоугольные и квадратные очертания.

Внутри городища среди развалин внутреннего помещения была обнаружена небольшая дощечка размером ~12×5 см со следами письменности. Она напоминает иероглифы, нанесенные черной тушью. На поверхности дощечки есть следы какого-то покрытия (вероятно, лака), похоже, что именно это и позволило сохраниться надписи, нанесенной на деревянную поверхность. По мнению научного сотрудника отдела Дальнего Востока Института восточных рукописей РАН (Санкт-Петербург) В.П.Зайцева эта письменность определена иероглифическая, по типу китайской (т.е. китайская, чжурчжэньская или «большое» киданьское письмо).

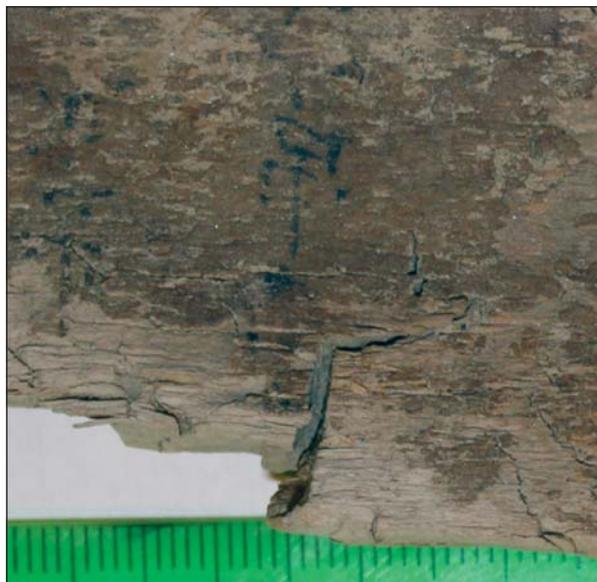
На поверхности развалин городища наблюдаются немногочисленные обломки керамической посуды, остатки изделий из металла. Неподалеку от крепостного вала в южной части города сохранился обломок большого железного котла с меандровым орнаментом и рельефным рисунком. На нем присутствуют изображения животного (возможно лани) и дерева, бытовые или ритуальные сцены из жизни древних жителей города.

### Кто они — древние земледельцы?

Представляется, что на основании размеров и очертаний город в первую очередь напоминает уйгурские городища соседней с Монголией Тувы, где таких насчитывается около 20. Ближайшие уйгурские городища в соседней Туве находятся всего в 100—150 км от обнаруженного нами города. С уйгурским временем (раннее Средневековье, VIII—IX вв.) связывается максимальное развитие земледелия [1].

Существование в раннем Средневековье благоприятного для земледелия климата подтверждается мощными погребенными почвенными горизонтами, обнаруженными в центральной Туве. Абсолютный возраст этих почв соответствует  $1300 \pm 80$  лет [5]. По предварительной диагностике\*, фракционный анализ гумуса погребенных почв (отношение Сгк к Сфк равно 4.088) может свидетельствовать о влажном и теплом климате раннего Средневековья. [6, с.70—74.]. Гумусированные горизонты мощностью около 50 см с весьма высоким содержанием углерода были обнаружены также под светло-каштановыми почвами на древних агроирригационных ландшафтах Монголии.

\* Анализ фракционно-группового состава гумуса погребенных почв, проведенный тувинской Государственной станцией агрохимической службы в г.Кызыле, выявил в образце №15 из юго-западного сектора участка Хадын содержание гумуса 0.94%, сумму гуминовых кислот (Сгк) 0.556%, сумму фульвокислот (Сфк) 0.136% и негидролизруемый остаток 0.248%.



Следы иероглифической письменности, обнаруженной в древнем городище.

Логично предположить, что обнаруженный город был заложен в раннем Средневековье. «Размах строительства городов, крепостей и селений в центрально-азиатском государстве уйгуров в VIII в. отмечали еще арабские географы. Например, Тамим ибн Бахр ал-Мутаваи, побывавший в Ордубальке на реке Орхоне, описал, что он ехал двадцать дней среди сплошных деревьев и многочисленных построек» [7, с.12].

Если город был заложен в уйгурское время, то он мог существовать и после падения уйгурского каганата. Обнаруженная надстройка крепостных стен говорит о длительном существовании города.

Иной возможный вариант — город был построен в более позднее время кыргызами, сокрушившими уйгуров в 840 г.

Древняя земледельческая культура кыргызов Минусинской котловины общеизвестна. После победы над уйгурами кыргызские военные переселенцы содействовали на новых территориях развитию орошаемого земледелия, широко распространенного в тот период в Минусинской котловине (например, в Туве) [8, 9].

Но строителями могли быть также кидани или монголы, вышедшие на арену Центральной Азии позднее и оставившие каждый свой след в ее истории.

У киданей, начавших занимать в начале X в. господствующее положение в Центральной Азии, также было развито земледелие. Их молодое государство Ляо, протянувшееся от Японского моря до восточного Туркестана, стало наиболее могущественной державой Восточной Азии. По мнению Л.Л.Викторовой, «кидани начали строить в Центральной Азии города, протянувшиеся це-



Гумусированные горизонты под светло-каштановыми почвами на древних агро-иригационных ландшафтах Монголии.

пью с востока на запад, для поддержания товарооборота, возросшего после образования империи... Археологические и нарративные источники показывают, что кидань переселяли в районы Центральной Азии китайских и бохайских земледельцев» (цит. по: [10, с.108—122]). По представлениям Ю.И.Дробышева, на рубеже X—XI вв. вдоль границ империи создавались гарнизонные поля. Солдаты пограничной службы обязаны были обрабатывать их и запастись зерно для снабжения армии. [10, с.111]. На основе китайских иероглифов и из китайских элементов письма у киданей возникла письменность (так называемые «большая» и «малая письменность»)\*.

С конца XI в. государство киданей приходит в упадок, а в 1125 г. его уничтожают чжурчжэни, создавшие Золотую империю Цзинь, рухнувшую впоследствии в результате нашествия монгольских полчищ Чингисхана. Часть киданьской знати (каракидане, или каракитаи) уходит в Среднюю Азию, где в районе рек Талас и Чу сложилось небольшое государство каракитаев — Западное Ляо (Си-Ляо), просуществовавшее с 1124 по 1211 г.

По мнению Л.Р.Кызласова, в XII—XIII вв. центр северной провинции государства Си-Ляо находился на территории древней Тувы. Каракитаи вели поиски и разработку полезных ископаемых и стройматериалов: выплавляли железо и чугун из местных железных руд, добывали уголь, кокс. Каракитайскими каменотесами изготавливались большие жернова для мельниц. Кызласов [12] считает, что именно киданям принадлежит большая сеть

древних каналов, растянувшаяся на десятки километров по «прилавкам» северного подножья хребта Танну-Ола, обрамляющего Убсунурской котловину с севера. Сеяли почти все известные в Китае того времени злаковые культуры: пшеницу, ячмень, просо и др.

Пришедшие затем к власти монголы вытеснили каракитаев. На захваченных территориях они также строили города, устраивали военно-пахотные поселения. К примеру, первые сведения о таких поселениях в Туве относятся к 1220 г. Пахали здесь в основном китайскими плугами с железными и бронзовыми лемехами и чугунными чечевицеобразными отвалами. На одном из монгольских поселений обнаружены отвалы, в которых найден предмет с китайской надписью с датой изготовления, соответствующей 1286 г. [13].

По данным В.В.Радлова, Г.Н.Потанин в конце XIX в. «нашел в Западной Монголии между озером Кыргыз-Нором и Убса... маленький народец турецкого языка. Это крепостные дюрботского вана и, очевидно, ведут происхождение от тех военнопленных из Средней Азии, которых калмыцкие ханы селили около своей резиденции с тем, чтобы те занимались земледелием. Они до сих пор еще должны доставлять вану ежегодно 400 мешков пшеничной муки, по одному мешку с каждой юрты» [14, с.26].

Но следы иригационных систем, обнаруженные в Убсунурской котловине, настолько велики, что «маленький народец», описанный Потаниным, не смог бы справиться с таким объемом работ. Масштабы орошаемого земледелия предполагают большую численность населения, проживающего на этой территории.

\* \* \*

Если же говорить о древней иригации Центральной Азии в целом, то вполне возможно, что оросительные системы Убсунурской котловины могут иметь и более древнюю (чем средневековая) историю.

Джейтунская культура ранних земледельцев Средней Азии возникла еще в 6-м тысячелетии до н.э. [1]. По мнению А.М.Малолетко, на рубеже 3-го и 4-го тысячелетий до н.э. в Средней Азии иссушение ксеротермической фазы суббореального периода привело к миграции земледельческих племен из предкопетдагских оазисов [15]. Археологические исследования эпохи бронзы в горной и предгорной полосе Джунгарского Алатау в северо-вос-

\* Бембеев В.Ш. Империя Ляо (<http://kalmyk.info/index.php/ru/menu-hystory/4-hystory-olds/2-2009-11-07-17-10-24>).

точном Семиречье позволяют говорить о занятии населения орошаемым земледелием. Около поселений, датируемых 2-м тысячелетием до н.э., просматриваются небольшие участки древнего орошения, остатки арыков [16]. Оросительные системы Хакасии относились Я.И.Сунчугашевым к карксугской культуре эпохи поздней бронзы [17].

По предварительным результатам исследования орошаемого земледелия в Туве также существовало в эпоху бронзы [18]. А находки спор культурного ячменя в Центральной Туве возрастом около 5 тыс. лет позволяют предполагать начало земледелия еще в неолите\*.

Уже в ходе подготовки статьи к печати были получены результаты радиометрической датировки образцов почвенного слоя, обнаруженного на крепостной стене летом 2013 г. По данным радиоуг-

леродного анализа, проведенного в лаборатории геологии и палеоклиматологии кайнозоя Института геологии и минералогии им.В.С.Соболева СО РАН\*, возраст погребенного на крепостной стене почвенного горизонта составляет 1010±40 лет. Таким образом, разрушение крепостной стены и формирование на ее обломках почвенного слоя произошло в конце 1-го тысячелетия н.э. (примерно в 940 г.)

Это вполне соответствует авторской интерпретации времени строительства найденного города. Город мог быть построен в эпоху раннего Средневековья и продолжать существовать также в начале 2-го тысячелетия. Последующие исследования помогут ответить на вопрос: кто же они — древние мелиораторы Центральной Азии? ■

\* *Потахин С.Б.* Разрез «Чиланнуг»: новые данные о природе Тувинской котловины во второй половине голоцена и зарождении неолитического земледелия (<http://oren-icn.ru/index.php/enzoren/stepene/132-sim2cat/1202>).

\* Анализ (№ СОАН-9196) проведен Л.А.Орловой, определение остаточной активности углерода выполнено на QUANTULUS-1220 (Liquid Scintillation Counters). Для расчета возраста использован период полураспада <sup>14</sup>C равный 5570 лет. Возраст рассчитан от 1950 г.

**Работа выполнена при поддержке Русского географического общества (грант №31/2013-Н4) и Российского гуманитарного научного фонда (грант №13-11-17002).**

## Литература

1. *Прудникова Т.Н.* Природные закономерности развития орошаемого земледелия в древней Туве: Автореф. дис. канд. геогр. наук. Барнаул, 2005.
2. *Прудникова Т.Н., Прудников С.Г.* Древние ирригационные сооружения котловины больших озер Монголии. География и геоэкология на современном этапе взаимодействия природы и общества // *Материалы Всерос. науч. конф. «Селиверстовские чтения»*. СПб., 2009. С.718—722.
3. *Прудникова Т.Н.* Древние оазисы Убсунурской котловины // *Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное использование: Материалы XI Убсунурского междунар. симп.* Кызыл, 2012. С.322—324.
4. *Прудникова Т.Н.* Исчезнувшие земледельческие цивилизации Центральной Азии // «Homo Eurasicus» в прошлом и настоящем: Материалы IV междунар. научн.-практ. конф. СПб., 2011. С.95—98.
5. *Прудникова Т.Н., Грачева А.С.* Почвы раннего средневековья Центральной Тувы // *Материалы III Междунар. конф. «Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее»*. Горно-Алтайск, 2013. С.289—291.
6. *Дергачева М.И.* Археологическое почвоведение. Новосибирск, 1997.
7. *Кызласов Л.Р.* Северное манихейство и его роль в культурном развитии народов Сибири и Центральной Азии // *Вестник МГУ. Сер.8: История*. 1998. №3. С.8—35.
8. *История Хакасии с древнейших времен до 1917 года*. М., 1993.
9. *Савинов Д.Г., Длужневская Г.В.* Кыргызы с IX—X вв. до XII в. СПб., 1998.
10. *Дробышев Ю.И.* Политика киданей в Центральной Азии // *Ученые записки отдела Китая Института востоковедения РАН*. 2010. Вып.2: Общество и государство в Китае: XL науч. конф. С.108—122.
11. *Васильев Л.С.* История Востока. М., 1998.
12. *Кызласов Л.Р.* Средневековые города Тувы // *Советская археология*. 1959. №3. С.66—80.
13. *Кызласов Л.Р.* История Тувы в средние века. М., 1969.
14. *Радлов В.В.* Этнографический обзор турецких племен Сибири и Монголии. Иркутск, 1929.
15. *Малолетко А.М.* Динамика климата Евразийских степей в голоцене // *Палеоэкология и расселение древнего человека в Северной Азии и Америке*. Томск, 1992. С.175—179.
16. *Грошев В.А.* К вопросу возникновения и развития ирригации Казахстана. Комплексные общества Центральной Евразии в III—I тыс. до н.э. // *Материалы междунар. конф.* Челябинск; Аркаим, 1999. С.333—335.
17. *Сунчугашев Я.И.* Памятники орошаемого земледелия в древней Хакасии. Красноярск, 1989.
18. *Прудникова Т.Н., Прудников С.Г., Стиваков Н.И.* Древняя мелиорация на юге Сибири — оросительные системы эпохи бронзы в Туве // *Материалы симп. «Мелиоративная наука на юге Сибири: прошлое, настоящее, будущее»*. Абакан, 2008. С.61—65.

# На берегах разноцветного озера

А.Л.Рижинашвили,

кандидат биологических наук

Государственный научно-исследовательский институт озерного

и речного рыбного хозяйства

Санкт-Петербург

Заметки и наблюдения

Начало сентября этого года запомнится лимнологам (ученым, которые занимаются исследованием озер) конференцией WLC15 (World Lake Conference), организованной не очень известным в России Международным фондом охраны озерной среды ILEC (International Lake Environment Committee foundation). Мероприятие проходило в итальянском городе Перудже — административном центре региона Умбрия, расположенном между Римом и Флоренцией, в самом центре Италии. Кроме череды докладов и их обсуждений в программе конференции были предусмотрены и полевые экскурсии в окрестности Перуджи.

Научные конференции обычно организуют в местах, которые как-либо связаны с их тематикой. Умбрию, «зеленое сердце» Италии, строго говоря, нельзя назвать озерным краем, ибо здесь есть лишь одно, но зато известное на весь мир Траси-

менское озеро (или Тразименское, Трасимено, Тразимено; в зарубежной литературе — Trasimeno). Сейчас это название на слуху у тех, кто использует итальянскую продукцию из оливок. Действительно, здесь любая дорога петляет по склонам, покрытым оливковыми рощами, да и сам город Перуджа со всех сторон окружен зелеными холмами — Умбро-Маркскими Апенниннами. Нужно заметить, что оливковые деревья на склонах холмов со стороны выглядят как-то прозаично, никогда и не подумаешь, что это, скажем, не ивы, а совсем другая группа растений, каких не встретишь в наших краях. Именно к озеру Трасимено и состоялись наши экскурсионные выезды. Благодаря им я смогла дважды посетить местные рыбохозяйственный и научно-образовательный орнитологический центры.

Озеро Трасимено расположено на высоте 257 м над ур.м. и имеет вулканическое происхождение. Большое по площади (128,6 км<sup>2</sup>), но мелководное (средняя глубина — около трех метров,

© Рижинашвили А.Л., 2014



Умиротворяющие холмистые просторы Умбрии.

Здесь и далее фото автора, кроме указанных случаев

максимальная — не более шести, на небольшом участке в центре), оно открыто ветровому перемешиванию. Водоем питается в основном дождевой водой, поэтому подвержен серьезным колебаниям уровня. Именно с ними связана интересная черта озера — его вода меняет цвет. Из окна автобуса, в котором мы проезжали по дороге вокруг озера, было заметно, что оно зеленое. Эта окраска характерна для периодов массового развития синезеленых водорослей (цианобактерий), хорошо известного как «цветение» воды. В целом, по наблюдениям итальянских лимнологов, в 2014 г. озеру был присущ голубой цвет из-за высокого уровня. Во время низкого стояния вода приобретает коричневатый оттенок, потому что она контактирует с донными отложениями и происходит их взмучивание (ресуспензия). Искусственным подземным каналом, сооруженным возле Сан-Савино, озеро связано с великой итальянской рекой Тибр. Водообмен возможен только тогда, когда уровень воды в озере достаточно высок для переброски. Однако итальянские коллеги сказали, что обмена в этой системе не было с конца 1980-х годов. Кстати, зеленый цвет воды в начале сентября был характерен и для Тибра, по крайней мере в окрестностях Перуджи. Озеро Трасимено имеет три острова, самый большой из которых и один из наиболее известных — Полвезе с рестораном и развлекательным комплексом. Это озеро — не только уникальный природный объект, но и исторический памятник (на его берегах во время Второй Пунической войны произошла знаменитая битва, в ходе которой римляне были разбиты армией Ганнибала).

Озеро Трасимено — подлинный птичий рай, ведь в его обширных макрофитных зарослях, образованных прежде всего южным, или обыкновенным, тростником (*Phragmites australis*), находят себе убежище и места для гнездования многие виды водоплавающих и околоводных птиц, как транзитные (останавливающиеся на отдых во время миграций), так и резидентные (постоянно обитающие). Вероятно, только на Трасимено птиц можно наблюдать круглые сутки. Они не боятся людских толп, приезжающих для популярного ныне в мире



Озеро Трасимено и рыбоводные пруды в Сан-Архангело.



Зеленые воды великой реки Тибр.

«бердвотчинга» (от англ. birdwatching, что означает наблюдение любителей и профессионалов-орнитологов за птицами в их естественной среде обитания). Если при подъезде к озеру из окна автобуса не заметно ничего особенного (лишь чайки, как водится, кружат над водной гладью), то на деревянных мостках орнитологического центра или у рыбоводных прудов бурная птичья жизнь моментально дает о себе знать. В первые минуты, когда наша группа экскурсантов двинулась по деревянному коридору, уводящему из ближних к берегу зарослей макрофитов к открытой водной поверхности, можно было слышать звонкое попискивание, шорохи, всплески воды. Жизнь кипит! Кто же тут есть? Попробуем разобраться. Вот на молодое фиговое дерево (*Ficus carica*), растущее у бере-



Мостки для «бердвотчинга» у орнитологического центра «Оазис натуралиста».

Чомга (*Podiceps cristatus*).Лысуха (*Fulica atra*).

Фото О.Ю.Дервенской

га, взгромоздилась камышница (*Gallinula chloropus*, водяная, или болотная, курочка), журавлеобразная птица, типичный обитатель зарастающих озер теплых регионов из семейства пастушковых. Не успела я нагледеться на черных как смоль птиц с красной бляшкой на лбу над наполовину красным, наполовину желтым клювом, как рядом с мостками в воде увидела мирно дрейфующую хохлатую поганку, более известную как чомга (*Podiceps cristatus*). Выяснилось, что этих птиц было несколько. Они иногда плавают вместе со своим молодым поколением, которое попискивает, что я и слышала в начале наблюдений. Молодые отличаются от взрослых окраской оперения — серый пушок основной части туловища, на голове заметны черные продольные полосы, переходящие на переднюю часть тела. Заслуживает внимание то, как взрослая чомга держит себя на воде: то она настороженно вытянет шею, то горделиво станет ее выпячивать, то попросту распушит брюшко и спокойно положит на него голову (словно и не птица, а какой-то неживой предмет плавает). Но кого здесь по-настоящему много, так это лысуха (*Fulica atra*). Эта, как и камышница, пастушковая птица — не редкость для водоемов Ленинградской области, встречается она и в черте Санкт-Петербурга. Коллеги из Казани, которые были со мной на экскурсии, тут же вспомнили, что у них лысухи бегают в городских парках за прохожими и выпрашивают еду. В орнитологическом центре, где мы наблюдали за птицами, лысухи облюбовали участок озера под затопленными деревьями, где было много поваленных стволов. Их любимая поза — стойка на одной ноге. Наш небольшой паром, на котором мы переправлялись на остров Полвезе, почти не напугал этих пернатых, которыми буквально усыпана прибрежная акватория. В начале нашей второй экскурсии над зарослями пронеслось



Кольцевание птиц. Слева — орнитолог М.Муззатти с окольцованным зимородком *Alcedo atthis* (фото О.Ю.Дервенской). Справа — птица в состоянии шока, вызванного процедурой.

какое-то странное стонущее мычание. Экскурсовод пояснила, что голос принадлежит грызуну нутрии (*Myocastor coypus*). В конце экскурсии мои коллеги даже увидели плывущего в зарослях зверька, но я, сколько ни всматривалась, не смогла его разглядеть. Однако впереди меня ждала запоминающаяся встреча с ним на рыбоводных прудах.

Особо нужно сказать о кольцевании птиц, которое производится в орнитологическом центре. Для нас показательную процедуру провел орнитолог Марио Муззатти (Mario Muzzatti). Птицы, отловленные с помощью специальной сетки, помещаются в матерчатые мешочки, которые висят рядом с рабочим столом орнитолога. После «распаковки» специалист надевает на лапку птицы кольцо, делает все необходимые измерения (прежде всего, длины маховых перьев), качественно определяет степень ее упитанности (дует на пуховые перья брюшка и осматривает кожный покров под ними) и взвешивает в специальном сосуде, верх которого закрыт материей. Дальше пленницу отпускают, причем по-разному — в зависимости от вида птицы. В первый экскурсионный день в сети попали деревенская ласточка (*Hirundo rustica*), садовая славка (*Sylvia borin*) и зимородок (*Alcedo atthis*), в основном молодые самки. Ласточку доверили выпустить моей коллеге, она вышла с ней за порог помещения. Славку же орнитолог освободил, открыв окно. Чтобы выпустить на волю зимородка, Муззатти пришлось выйти на улицу. Удивительно, как человеческие руки не повреждают нежную птичку, несмотря на довольно суровую процедуру кольцевания. На второй день в руках орнитологов вновь оказались славка (на сей раз черноголовая — *Sylvia atricapilla*) и зимородок. Зимородки во время кольцевания обычно сопротивляются особенно отчаянно, пытаясь поранить клювом пальцы «мучителя». Муззатти продемонстрировал нам интересный феномен: положил зимородка на спинку на каменную плиту, и тот лежал без движения в буквальном

смысле кверху лапками, а после прикосновения улетел. По мнению орнитологов, такое поведение объясняется шоком, которое испытывают пернатые после процедуры кольцевания.

На рыбоводных прудах в Сант-Архангело нас ждало знакомство с гораздо более крупными представителями пернатых. Как только мы приехали, невдалеке в небе появилась серая цапля (*Ardea cinerea*), которая сделала несколько неуклюжих кругов в воздухе и села в крону ближайшего дерева. Вскоре появились и ее родственницы — сначала большая белая цапля (*Egretta alba*), разгуливавшая на берегу дальнего пруда, а затем малая белая (*Egretta garzetta*), приземлившаяся рядом с другим прудом. Эти птицы близко к себе людей не подпускают, поэтому их пришлось фотографировать издалека. И конечно же, нельзя не упомянуть о еще одной примечательной встрече на прудах — с нутрией. Небольшой грызун спокойно устроился на берегу, когда я издалека его заметила и поначалу



Большая белая цапля (*Egretta alba*).

Нутрия (*Myocastor coypus*).

Ящерицы *Podarcis siculus* (вверху; заметна утрата части правой задней конечности) и *P. muralis* (двуххвостость возникла в результате неполной аутомии: первый хвост не был отброшен полностью, и начал расти второй).

приняла за неживой предмет. Постепенно, медленно приближаясь и делая снимок за снимком, я стала различать его довольно массивную голову, которой он напоминает бобра. Зверек насторожился, но, к моему удовольствию, подождал, когда я сделаю его портрет вблизи, и пустился в плавь.

Местное рыбноводное хозяйство очень небольшое. Оно состоит из рыбноводных прудов под открытым небом на берегу озера и помещения, напоминающего ангар, в котором размещены аквариумы с рыбами, бассейны и оборудование. В ак-

вариумах живут рыбы, обитающие в Трасименском озере: щуки, карпы, угри, сомы, окуни. Совершенно неожиданным образом во время экскурсии я увидела в одном из прудов черепахи. На мой вопрос, не разводят ли их для еды, мне ответили, что красноухие черепахи (*Trachemys scripta*) живут здесь «под арестом». Их систематически вылавливают из озера и переносят в эти резервуары, поскольку они объедают водную растительность. Приятно, что никто и не думает уничтожать этих «вредителей», ведь жители Умбрии, как и всей Италии, очень любят природу.

В последний день конференции стояла особенно хорошая погода — теплая и солнечная. В парке рядом с гостиницей я смогла сфотографировать кольчатых горлиц (*Streptopelia decaocto*). Это птицы южных стран из семейства голубиных, я видела горлиц (возможно, другого вида) в Болгарии, там их даже больше. Но и в Перудже их своеобразное воркование обращает на себя внимание. Еще я встретила в городе небольших зеленых ящериц *Podarcis siculus*, которые то и дело сновали под ногами, моментально скрываясь в траве газона (все же я успела их сфотографировать). В объектив попались и пестро окрашенные ящерицы *P. muralis*, тоже из группы так называемых стенных. Нельзя не упомянуть о том, что Перуджа — это город собак (домашних, конечно, не бродячих). Здесь они есть почти у каждого жителя, иногда и не по одной. Настоящая галерея пород — голубоглазые хаски, охотничьи псы, белые швейцарские овчарки, черные лабрадоры, мопсы, ретриверы, стаффордширские терьеры. Все животные очень спокойные, практически не лают на прохожих, в общественных местах гуляют исключительно на поводках. А вот представителей семейства кошачьих на улицах я почти не видела. Две кошки жили в рыбноводном хозяйстве, да еще пара боязливо сбежала от меня в кусты, когда я гуляла рядом с гостиницей. Скорее всего, здесь эти зверьки сидят по домам, а на улице их не пускают. Впрочем, это так и осталось невыясненным.

Завершая свой рассказ, обращаю внимание на весьма актуальную сейчас проблему взаимопонимания людей разных стран. В любой зарубежной поездке встречаешься и общаешься с людьми разных национальностей и культур. Подчас бывает трудно разговаривать на чужом языке, но, стоит назвать латинское наименование организма или написать химическую формулу, коллеги с разных континентов понимают тебя одинаково. А экскурсии на природу особенно сплачивают. Сам собой напрашивается важнейший вывод — знания (и в первую очередь естественнонаучные — о том, что нас окружает) объединяют всех людей Земли, независимо от пола, возраста, религиозных убеждений, национальности, расы. В наш непростой век обострения политических и социальных конфликтов и экологических кризисов нужно это помнить. ■

# Бактериальный газовый фильтр

Г.А.Карпов,

доктор геолого-минералогических наук

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН  
Петропавловск-Камчатский

Я держу в руках книгу среднего формата, в мягкой обложке голубого цвета, на которой помещена фотография уникальной во многих отношениях кальдеры Узон на Камчатке. Эта фотография очень уместна здесь. Она как нельзя лучше отражает сущность предмета исследований автора, безусловно, выдающегося российского микробиолога, академика Георгия Александровича Заварзина, с которым мне, к счастью, довелось поработать в совместных экспедициях. Термальные поля кальдеры Узон полны микробиологической жизни. Именно здесь воочию можно убедиться в справедливости гениального открытия Георгия Александровича — важнейшей роли бактерий в качестве первичного органического фильтра, модифицирующего вулканические газы и с ранних геологических эпох поставляющих кислород в атмосферу.

Сам автор во «Введении» пишет, что задумал книгу как научно-популярную, задавшись целью доступно осветить, используя большой багаж знаний естественных наук, сложные научные вопросы микробиологии, прежде всего касающиеся взаимосвязи между составом атмосферы и бактериями. Рассмотрение такой масштабной задачи Георгий Александрович начинает с формулировки 12 основных положений, справедливость которых он и доказывает далее. Отправным пунктом его строго научных, основанных на боль-

шом фактическом материале построенный стал постулат: «Современная атмосфера существует с начала фанерозоя, т.е. до появления высшей растительности, и состав ее поддерживается постоянным вследствие действия циклического механизма, включающего в качестве основного компонента кислород-углекислотный цикл, обусловленный фотосинтезом высших растений и дыханием грибов и бактерий» (с.7).

Логично следуя пошаговому освещению вопросов биогеохимической эволюции, суть которой состоит, по Заварзину, «в замене одного действующего агента другим при взаимодействии окислительной атмосферы с восстановительными эксгалляциями» (с.9) на протяжении всей геологической истории, автор начинает свою работу с рассмотрения состава атмосферы и сущности основных процессов в ней. Показав состав тропосферного воздуха, он подчеркивает, что ведущее соединение в системе тропосферных реакций — радикал  $\text{OH}$ , образующийся фотохимически. Этот радикал — своеобразный чистильщик. Продуцирующиеся в основном микроорганизмами в почве и поступающие в тропосферную систему газы, такие как  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и половина объема  $\text{SO}_2$  и  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ , вследствие фотохимических реакций с радикалом  $\text{OH}$  очень быстро разлагаются. При этом Заварзин подчеркивает, что «почвенный воздух — это своеобразная газовая среда, отлича-



**Г.А.Заварзин. БАКТЕРИИ И СОСТАВ АТМОСФЕРЫ** / Отв. ред. А.А.Имшенецкий, предисл. М.С.Гиллярова, Е.А.Бонч-Осмоловской. Изд. 2-е, доп.

М.: Ленанд, 2014. 200 с.

ющаяся от приземного воздуха» (с.18). Как особую область выделяет он и поровые воды донных отложений океана, где, по его мнению, особенно велика роль микробной жизни.

Рассматривая далее происхождение атмосферы, Георгий Александрович обращает внимание читателя на то обстоятельство, что на ранних этапах геологического развития Земли основным источником поступления газов в атмосферу были вулканические эксгаляции, в составе которых основное место занимали пары воды, углекислый газ, а также  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $HCl$ ,  $HF$ . На основании факта, что пределы содержания  $H_2O$  и  $CO_2$  в атмосфере определяются возможностью необратимого парникового эффекта, Георгий Александрович делает выводы, что «содержание этих компонентов в газовой фазе за всю историю Земли не отличалось существенно от современного» (с.23) и что воды океана всегда играли важную роль в стоке кислых газов —  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$  и  $HF$  из атмосферы. Это принципиально важно. Автор также отмечает, что количественное представление о ходе накопления летучих компонентов в истории Земли получить весьма трудно, но резонно указывает, что в качестве индикаторной системы можно использовать инертные газы — аргон, гелий и др., учет количества которых (для представлений о степени ювенильности глубинных эксгаляций) широко применяется в геологии.

Сопоставив состав газов атмосферы с составом вулканических газов и отметив, что для формирования современной атмосферы последние должны были претерпеть определенную модификацию, Заварзин далее методично рассматривает механизмы этого процесса. Отталкиваясь от факта, что согласованное изменение состава атмосферы и океана произошло около 2 млрд лет назад, и не находя других причин для объяснения

этого феномена, автор обращает внимание, что именно с этого времени на Земле начинает действовать биологический фактор. По его мнению, изменение атмосферы «можно приписать лишь накоплению результатов деятельности микроорганизмов-прокариот по модификации в первую очередь газовых составляющих» (с.32). По-видимому, постепенно резервуар атмосферных газов модифицировался деятельностью бактерий, и в итоге основными компонентами атмосферы оказались  $N_2$  и  $CO_2$ . Азот поступал из дегазирующихся изверженных пород и вследствие своей химической инертности быстро накапливался в атмосфере. А куда был израсходован углекислый газ? Автор справедливо указывает на мощные толщи карбонатов среди древнейших осадочных пород. Первичная углекислота могла растворяться в водах океана, где связывалась с растворенными ионами  $Ca$  и  $Mg$  с образованием карбонатных пород. Георгий Александрович обращает внимание на то обстоятельство, что в это время получили развитие и так называемые строматолиты, бесспорно имеющие бактериальное происхождение. Этот факт в настоящее время практически доказан обнаружением современных строматолитов на вулканогенных термальных полях. И автор книги, следуя логике своих теоретических построений, далее детально рассматривает вопрос о возможности существования микроорганизмов и их сообществ, не зависящих от солнечной энергии, а использующих для жизни газовые выделения из глубин Земли. Этому вопросу посвящены главы II («Гидротермы и бактерии в них»), III («Трофические системы прокариот») и IV («Цианобактериальные сообщества»).

Рассмотрение микробных сообществ в современных гидротермах Заварзин начинает с хемолитотрофных бактерий. Как известно, хемотрофы не

нуждаются в солнечном свете, а используют энергию окислительно-восстановительных реакций. Обратив внимание на то, что эти организмы могут в принципе использовать любую окислительно-восстановительную реакцию, которая совместима с существованием воды, автор указывает, что «для существования такой группы микроорганизмов необходим длительный и достаточный приток энергии, способный поддерживать популяцию бактерий плотностью  $\geq 10^4$  клеток на грамм... В современных условиях такой поток возможен для веществ, участвующих в циклических биогенных превращениях, т.е. для биогенных элементов» (с.34).

Среди хемолитотрофных бактерий выделены группы специализированных бактерий. Большая их часть живет в аэробных условиях — водородные (окисляющие водород кислородом воздуха), нитрифицирующие (окисляющие восстановленные соединения азота), тионовые и серные (окисляющие восстановленные соединения серы), метаноокисляющие, карбоксидотрофные (окисляющие моноокись углерода), железобактерии (окисляющие двухвалентное железо). Вместе с тем известна большая группа микроорганизмов, которые используют для своей жизнедеятельности не только неорганический донор, но и неорганический акцептор электрона — иной, чем кислород. Это, в первую очередь, сульфатредуцирующие бактерии и бактерии, восстанавливающие серу водородом, а также метанобразующие бактерии, восстанавливающие водородом  $CO_2$ . Существует и ряд микроорганизмов, восстанавливающих водородом окислы азота, а также окисленное железо, причем, подчеркивает автор, в этих случаях процессы лучше идут с органическим веществом как восстановителем. Здесь Георгий Александрович снова напоминает, что все компоненты,

которые используются хемолитотрофными бактериями, характерны и для вулканических газов, а именно  $H_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $S^0$ . И пишет, что, следовательно, «в местах выхода вулканических газов можно ожидать присутствие микробных сообществ, использующих для своей жизнедеятельности не продукты разложения органического вещества, синтезированного другими организмами, а поток глубинных эксгаляций» (с.36). Эта идея не нова, но только в последние годы, благодаря открытиям микробиологами на термальных полях современных вулканических структур, а также на термогенерирующих разломных зонах в глубинах океана большого количества термофильных и экстремально-термофильных микроорганизмов, она получила свое развитие. И автор настойчиво еще раз подчеркивает: «Очевидно, что совпадение субстратов литотрофных кальдерных микроорганизмов и характерных окисляемых компонентов глубинных эманаций не случайность, а прямое следствие той геохимической системы, в которой эти организмы развиваются» (с.37). В разделе «Гидротермы как место обитания бактерий» Заварзин дает предложенную вулканологами классификацию гидротерм по газовому составу, а в следующем разделе («Вулкан Узон и микробная деятельность в нем») рассматривает для разных типов гидротерм и характерные сообщества термофильных микроорганизмов, и геохимические процессы с участием термофилов.

Для геологов особенно важен материал по сернокислотному выщелачиванию пород, окружающих термальные источники. В одноименном разделе автор очень детально рассмотрел различные условия и источники проявления сероводорода в вулканических эксгаляциях, показал схемы деятельности разнообразных специфических аэробных термо-

фильных и мезофильных микроорганизмов, в том числе и продуцирующих серную кислоту, отметил условия формирования связанных с ними так называемых структурных глин. В разделе «Анаэробные реакции в наземных гидротермах» Георгий Александрович снова вернулся к анаэробным термофилам — метаногенам и сероредукторам. Субстратом для их жизнедеятельности в гидротермах Йеллоустонского национального парка, Узон-Гейзерной гидротермальной системы и Исландии служат среды с водородом. Заварзин подчеркивает здесь, что работам российских и зарубежных микробиологов, в первую очередь К.О.Штеттера и В.Циллига, мир обязан сенсационным открытием гипертермофильных бактерий-архей с широким оптимумом температур, вплоть до  $105^\circ C$ .

Анаэробным бактериям в зонах проявления высокотемпературных гидротерм океана посвящен следующий раздел главы. Автор обращает внимание на хемосинтезирующих бактерий (окисляющих серу и метан), обитающих в полной темноте и при высоких температурах. В таких же условиях существуют и термофильные метанобразующие бактерии. Заварзин поддерживает здесь распространенную среди исследователей подводных гидротерм океана концепцию, что вся эта обильная микрофлора литотрофных организмов развивалась «за счет газов, образующихся при реакции морской воды с подушечными лавами на дне океана» (с.54). По моему мнению, можно допустить и прямую эксгаляцию вулканических газов по зонам разломов в областях молодой вулканической деятельности на дне океана. Подтверждением этих представлений можно считать описанный далее Георгием Александровичем биоценоз гипертермофильных бактерий, обнаруженных океанологами в местах проявления гидротермальных сульфидных черных

курильщиков, где вода именно глубинными эманациями была нагрета до  $380^\circ C$ . Здесь, как и следовало ожидать, продуцентами водорода и метана оказались анаэробные термофилы. Возможными восстановителями, по мнению Заварзина, служат сероводород, а также двухвалентные железо и марганец. Таким образом, пишет автор, «...верхняя граница роста термофилов не установлена, хотя она лежит заведомо выше  $100^\circ$ » (с.55–56). Это, конечно, с учетом повышенного давления столба воды.

В разделе «Газы метаморфизма», завершающем главу II, Георгий Александрович коротко сообщает о развитии осцилляториевых синезеленых водорослей в обводненных грязевых вулканах на востоке и западе Кавказского хребта и на Керченском п-ове. Здесь же он и слегка касается вопроса о связи проявлений сероводорода в Черном море с деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий и гипотезы, согласно которой само Черное море представляет собой гигантскую гидротерму. В данном случае, по его мнению, «микробная деятельность связана не с продукцией сероводорода, а с работой бактериального газового фильтра» (с.57). Не прошел автор мимо и углеводородокисляющих бактерий, аномальное развитие которых наблюдается над нефтегазовыми месторождениями. Их сообщества он также рассматривает как катаболический бактериальный фильтр, способный поглощать углеводородные газы.

Завершая рассмотрение деятельности хемолитотрофных организмов, Заварзин закономерно приводит читателя к важному выводу: «Таким образом, в природе существует бактериальный газовый фильтр, модифицирующий глубинные газы. Эти организмы способны катализировать один этап в реакциях взаимодействия глубинных восстановленных эксгаляций

с окислительными фотохимическими реакциями в атмосфере. Однако они не могут служить источником кислорода и характерного для биосферы сопряжения кислород-углекислотного цикла с циклами других элементов» (с.59).

Эту способность бактерий создавать систему реакций, обеспечивающих биогеохимические циклы на Земле, Георгий Александрович рассматривает в главе III («Трофические системы прокариот»).

Здесь автор сразу подчеркивает, что «если рассмотренные выше обитатели гидротерм могли удалить некоторые восстановленные вещества, превратить  $\text{CO}_2$  в такие соединения, как органические вещества биомассы, метан, ацетат, то возможность образования  $\text{O}_2$  целиком определяется наличием фотосистемы II. Бактерии, обладающие фотосистемой II и, соответственно, кислородным фотосинтезом, относят к цианобактериям, или синезеленым водорослям. Оба названия полноправны» (с.59–60). Далее, кратко объяснив сущность катаболической и анаболической систем микробного газообмена, основанного на реакциях энергетического обмена, автор подчеркивает, что «фотосинтез с участием фотосистемы II, очевидно, служит фокусом, в котором пересекаются и анаболическая, и катаболическая системы. Самые простые организмы, обладающие кислородным фотосинтезом, — цианобактерии» (с.60). Указав на важность этой группы микроорганизмов в вопросе формирования кислородной атмосферы и всех сопряженных кислород-углекислотных биохимических циклов, Георгий Александрович счел необходимым уделить внимание вопросам устройства цианобактерий и объяснению их биохимических функций. Профессиональным языком он делает это в разделе «Биохимическое сопряжение циклов углекислоты и кислорода», после чего в специаль-

ных разделах возвращается к описанию сущности анаболической и катаболической систем обмена газов. Сделав акцент на том, что «бактерии обладают наиболее разнообразными механизмами для превращения неорганического углерода в органическое вещество» (с.66), Заварзин затем рассматривает схемы ассимиляции бактериями углекислоты и молекулярного азота. Особенно детально автор описал катаболическую систему микробного газообмена, в которой выделил многочисленные фототрофные бактерии — продуценты, геохимическая функция которых сводится главным образом к окислению в анаэробных условиях восстановленных соединений серы, в меньшей мере водорода и жирных кислот.

Далее Георгий Александрович касается вопросов деструкции органического вещества. Отметив разную степень изученности циклов разложения биомассы, он коротко осветил условия деятельности аэробных и анаэробных биоценозов, указав на возможность сопряжения реакций факультативных анаэробов с аэробными процессами. Особенное внимание автор уделяет серному циклу деструкции органического вещества. Он подчеркивает, что если жизненно важное условие группировки первичных анаэробов — удаление продуктов обмена, то вторичные анаэробы серного цикла используют продукты обмена первичных анаэробов, главным образом сульфат, и «в настоящее время продуцируют практически весь сероводород, образуемый на Земле. Поступление  $\text{H}_2\text{S}$  с вулканическими эксгаляциями представляет незначительную величину от общей продукции» (с.81). Это очень важный вывод. Далее автор рассматривает группы микроорганизмов, осуществляющих окислительное замыкание цикла серы.

Значительное внимание уделено и четвертому циклу дест-

рукции органического вещества — метановому. Заварзин подчеркивает, что только для метанобразующих бактерий реакция образования метана служит единственным источником энергии. Это происходит при крайне низких значениях окислительно-восстановительного потенциала. Поэтому эти бактерии относятся к наиболее строгим анаэробам. Указав на возможные составы субстратов, потребляемых метанобразующими бактериями, и на морфологическое разнообразие микробов, автор обращает внимание на широкий температурный интервал их развития, вплоть до  $100^\circ$ , но узкий предел pH — от 6 до 8. Отметил автор и поразительную уникальность как состава клеточных компонентов, так и состава липидов и нуклеиновых кислот метанобразующих бактерий, что определило выделение их в самостоятельную группу архебактерий. Подчеркнул Георгий Александрович и исключительность катаболизма и анаболизма метанобразующих бактерий, что и определило возможность их развития лишь в сообществе с другими бактериями. Коротко коснувшись здесь особенностей метанокисляющих бактерий, синтрофные взаимодействия микроорганизмов, в том числе и метанобразующих, автор детально рассмотрел в следующем специальном разделе.

Как естественное продолжение темы трофических систем микроорганизмов и в качестве примера Заварзин далее, в наиболее крупной главе IV, подробно рассматривает цианобактериальные сообщества. С позиции модификаторов газов он достаточно детально охарактеризовал цианобактериальные сообщества гидротерм, соленых водоемов, озер, луж и почвенных водорослей, сделав акцент именно на свойствах цианобактериальных матов как биологических фильтров газов. Он убедительно показал, что «цианобактериальное сообщество в местах выхода

глубинных газов способно в светозависимых реакциях поглощать и модифицировать основные восстановленные компоненты этих газов, за исключением метана. Основными продуктами обмена таких матов являются биомасса, органическое вещество, сера и кислород» (с.102). Проанализировав большой фактический материал, автор пришел также к очень важному методическому выводу: «Реакции в мате определяются градиентами на протяжении сотен микрометров. Поэтому усредненный химический подход оказывается просто неприложимым к исследованию плотных цианобактериальных сообществ» (115).

Исключительно важен раздел «Геохимические барьеры в цианобактериальном сообществе». Заварзин отмечает, что характерное для цианобактериальных матов отложение карбонатов кальция может быть обусловлено разными причинами, приводящими к резким изменениям рН. «Сульфатредукция под цианобактериальным матом создает сероводородный барьер на пути миграции минерализованных вод и, соответственно, обуславливает отложение металлов, сульфиды которых малорастворимы. Щелочные и щелочноземельные металлы могут проходить через этот барьер... В зоне фотосинтеза в мате происходит удаление  $\text{CO}_2$  и, соответственно, увеличение щелочности и повышение Eh за счет выделяемого кислорода. <...> В результате мат представляет собой окислительно-восстановительный и щелочной геохимический барьер» (с.116). Факт наблюдаемого в матах связывания  $\text{CO}_2$  с Ca с образованием карбонатов, а также данные геологов о том, что карбонатные осадки протерозоя часто содержат громадные массы строматолитов, дали автору основание для важного теоретического заключения: «Цианобактериальный мат мог сыграть глобальную роль в разгрузке атмосферы от углекислоты» (с.118).

Далее автор кратко рассматривает место водорода в газовой системе цианобактериального мата и обращает внимание читателей на отличие такого мата от систем, создаваемых высшими растениями. Заварзин задает принципиальный вопрос: «Важно понять не то, как высшие растения повлияли на газообмен на Земле, а как они включились в круговорот, сложившийся под влиянием альгобактериальных сообществ» (с.121). Говоря о регуляции газового состава атмосферы, Георгий Александрович снова обращает внимание на почвенную микрофлору, которая формирует особую газовую среду своего обитания — почвенный воздух. Этой теме полностью посвящена глава V, в которой рассмотрены особенности формирования приземного воздуха, газообмен в почве, микрокомпоненты в газообмене почвы, газообразные соединения азота в почве. Уделено внимание экологическим последствиям усиленного применения минеральных удобрений и связанной с этим эвтрификации почвы.

В разделе «Микробы и климат» автор сетует на недостаточность наших знаний о составе атмосферы «за пределами очень короткого современного периода» (с.141). Но считает, что «сам факт наличия обратной связи между климатом, с одной стороны, и развитием растительности и деструктивных процессов, обусловленных бактериями, — с другой, необходимо учитывать» (там же).

Материал предыдущих глав был нужен автору как подход к оценке количественного согласования потоков биогенных элементов, в понимании которого, по его мнению, существует еще много неопределенностей. Тем не менее, благодаря опубликованным материалам международной организации СКОПЕ (Scientific Committee on Problems of the Environment) появилась возможность обратиться к некоторым обобщениям, поз-

воляющим сделать количественные оценки основных биогеохимических циклов и их взаимодействий. Заварзин рассматривает эти данные в главе VI («Биогеохимические циклы»). Дав общие схемы циклов углерода, азота, серы, фосфора, автор подводит читателя к факту существования явных географических закономерностей глобальных микробных процессов. Микробные экосистемы оказываются приуроченными к конкретным географическим зонам. Циклы биогенных элементов связаны не только между собой, но и с другими геохимическими важными элементами. Но автор еще раз подчеркивает, что «определяющим фактором для атмосферы Земли является биологический кислород-углекислотный цикл» (с.146). В разделе, посвященном этому вопросу, Георгий Александрович логично показывает, что, «рассматривая судьбу основного характерного газа земной атмосферы — кислорода, необходимо учитывать не только продукционную ветвь, обусловленную кислородным фотосинтезом, но и ветвь деструкции, оценивая вклад микроорганизмов в этот процесс» (с.153). Об этом же говорится и в разделе «Захоронение органического углерода», где автор приводит схемы и количественные характеристики этих процессов, закономерно показывающие, что «решающее значение для баланса  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  имеет не столько скорость фотосинтеза, сколько скорость разложения органического вещества» (с.160—161), которая сильно зависит от температуры. При этом важна корреляция между температурой и растворимостью  $\text{CO}_2$ , поскольку основной резервуар этого газа — карбонат-бикарбонатная система океана. Сначала прокариотные, а затем и эукариотные микроорганизмы, способствуя образованию карбоната кальция, могли сильно влиять на содержание кислорода в атмосфере. В связи с этим Заварзин делает еще

один важный вывод: именно «неполное разложение биомассы водорослей при значительном вкладе анаэробных процессов обуславливает соответствующее накопление кислорода» (с.161).

Показав все схемы поведения атмосферообразующих элементов в биогеохимических циклах и объяснив, каким образом распределялись в истории Земли микробные процессы, Георгий Александрович завершает свою книгу главой «Историческая микробиология». Здесь он обозначил подход к решению фундаментальной проблемы — откуда появились бактерии? Критически рассмотрев концепцию А.И.Опарина небиологического синтеза органических веществ, он приходит к выводу, что филогенетические построения, основанные на представлении о последовательном возникновении бактерий со все более сложными биосинтетическими возможностями — от примитивных анаэробных гетеротрофов, питающихся остатками «первичного бульона», до вполне автономных фототрофов-цианобактерий, не очень состоятельны. Развивая свои представления, изложенные в 1974 г. в книге «Фенотипическая систематика бактерий. Пространство логических возможностей», Заварзин обращает внимание, что «жизнь на Земле по меньшей мере такая же древняя, как осадочные породы и океан» (с.164). Речь идет о возрасте около 3.5 млрд лет. И, по данным сравнительной планетологии, незадолго до этого рубежа закончился этап усиленной метеоритной бомбардировки Земли. Автор согласен с предположением Ф.Хойла и других авторов о возможности заноса с космическими телами на Землю живых существ. По его мнению, ледяные ядра комет могли бы быть таким транспортом, в котором в состоянии анабиоза микроорганизмы сохраняются в течение значительного времени. Задав самому себе sacramentalный вопрос, какие организ-

мы могли перенести транспортировку и найти условия для существования на Земле, Георгий Александрович приходит к выводу, что ими могли бы быть бактерии.

Для решения вопроса о конкретных организмах, которые могли бы, создав атмосферу, обеспечить условия для эволюции высших организмов, известной по палеонтологической летописи, он рассматривает далее биогеохимические условия на Земле в архее, исходя из общепринятой оценки геологами этапов ее развития. Здесь важно то обстоятельство, что «геологические события на Земле около 3.8—4.0 млрд лет назад могли препятствовать выживанию даже прокариотных организмов» (с.167). Опираясь на исследования П.Клауда (1980) и А.Б.Ронова (1982), Заварзин считает, что в архее гидросфера уже содержала в отдельных местах некоторое количество свободного кислорода, что обеспечивало образование залежей с окисленным железом, но были ли эти руды следствием жизнедеятельности бактерий — пока не доказано. В то же время автор обращает внимание на присутствие рассеянного углерода в осадочных породах на всем протяжении геологической истории. А углерод мог быть там скорее всего как результат фотосинтеза.

Следующий огромный резервуар для связанного кислорода — это сульфаты моря, и автор замечает, что «сульфаты в эвапоритах обнаруживаются в самых древних осадочных породах» (с.171). Опираясь на данные анализов изотопии серы, Заварзин показывает, что уже 1.7 млрд лет назад появляются эвапориты, обогащенные тяжелой серой сульфатов, а это может свидетельствовать о устойчивом развитии бактериального восстановления сульфатов. Следовательно, подчеркивает автор, «происходило хемолитотрофное окисление соединений серы кислородом, что в свою очередь предполагает форми-

рование кислородной атмосферы» (с.172). Георгий Александрович корректно напоминает далее, что в интерпретации данных изотопии серы имеются ограничения, связанные с необходимостью учета объема резервуара сульфата, а также возможности биологического образования сульфатов в анаэробных условиях при деятельности фотосинтезирующих бактерий. Надо иметь в виду также, что в некоторых условиях большое значение имеют короткий цикл серы, заключающийся в восстановлении молекулярной серы в сероводород, и окисление сероводорода в молекулярную серу. Тем не менее, говорит далее автор, «историческая микробиология располагает и прямыми свидетельствами развития бактерий в геологическом прошлом: к ним относятся в первую очередь строматолиты и микрофоссилии» (там же).

Дав краткое описание строматолитов и микрофоссилий, Георгий Александрович сделал два главных вывода. Первый: строматолиты — это макроструктуры, оставленные сообществом бактерий. По аналогии с современными они могут быть указанием на одновременное существование других цианобактериальных сообществ, остатки которых не сохранились, или просто пока мы не научились их находить. Второй: микрофоссилии находят свои достаточно полные аналоги среди современных организмов (цианобактерий). Они позволяют считать наиболее вероятным представление, что бактерии обладают совершенной персистентностью, т.е. что они сохранились неизменными в тех группах, которые можно наблюдать с протерозоя или даже с архея.

В следующем разделе («Геохронологическая шкала») автор развивает эту тему, отметив довольно широкую распространенность микрофоссилий и строматолитов в осадочных породах начиная с протерозоя. И пишет о том удивлении, кото-

рое вызывает у него то обстоятельство, что основные особенности прокариот, их образовавших, «возникли быстро и хорошо установлены уже 2 млрд лет назад» (с.176). Морфологические различия построек строматолитов, по мнению автора, могут свидетельствовать о сукцессиях в цианобактериальных сообществах, связанных со многими факторами: изменением климата, экологической обстановкой, тектоническими процессами и др. Но главное — «летопись докембрийских бентосных организмов, составляющих строматолиты, обнаруживает крайне малые вариации. Микрофоссилии остаются свидетельством консервативности прокариот. <...> Приходится сделать вывод, что эволюция прокариот шла иными темпами и иначе, чем у высших организмов» (с.177). И автор подводит читателя к следующему выводу: «представление о персистентности бактерий имеет фундаментальный характер для понимания и эволюции, и истории биосферы, и возможности применения принципа актуализма в биологии» (там же). «Высшие организмы в большинстве своем не персистентны» (с.178). Завершает раздел Георгий Александрович важным генетическим выводом: «Многообразие бактерий формировалось путем обмена относительно небольшими участками генома, несущими экологически важные признаки; это привело к созданию комбинаторной системы в соответствии с пространством логических возможностей, под которым с сильным упрощением понимается определенное положение в трофической системе» (там же). Далее автор отмечает, что тем не менее «остается принципиальное затруднение в необходимости согласовать циклический характер биологических процессов с несомненно поступательным движением всей системы в целом. Это является таким же фундаментальным фактом, как и консервативность микробного мира» (с.179).

Верный своей системе исследований, базирующейся на логическом осмыслении огромного количества фактографического и экспериментального материала, Заварзин, завершая обсуждение поднятых в начале книги проблемных вопросов, в последнем разделе («Прокариотные экосистемы как база эволюции») снова напоминает о принципиальных затруднениях в необходимости согласовать циклический характер биологических процессов с несомненно поступательным движением всей системы в целом. Он еще раз кратко возвращается к характеристике циклов важнейших элементов биосферы на разных этапах геологического развития Земли и приходит к следующему выводу: «Анализируя историю прокариотных систем, насколько она может быть реконструирована сейчас, можно обнаружить некоторые общие закономерности. 1. Ни на одном этапе не происходит катастрофического нарушения глобальных циклов элементов. <...> 2. Циклы не изменяются, потому что ни один новый агент не может найти себе места в системе иначе, чем в уже существующем цикле. В противном случае для него нет логической возможности выжить при его заведомой первоначальной малочисленности. <...> Высшие растения встраиваются в систему, созданную водорослями, но не проникают в океан, водоросли заменяют цианобактерии, но не проникают в водоемы с неустойчивой соленостью. В свою очередь, вся прокариотная система могла возникнуть лишь на основе геохимических циклов, в которые она и встроилась, катализируя термодинамически вероятные реакции. 3. Каждая новая система приводит к модификации предыдущей путем количественного изменения определенных этапов. <...> Транспортные средства — атмосфера и океан делают локальные изменения глобальными. <...> 4. Исторические

факторы приводят к тому, что циклические процессы сменяют прямые цепи реакцией. <...> Циклы становятся все более многоступенчатыми, с многими маршрутами, которые могут заменять друг друга. 5. Малоспецифические бактериальные процессы, ведущие к формированию карбонатных осадков и химически устойчивых геополимеров, в которых сохраняется органическое вещество, оказываются ключевыми для понимания формирования атмосферы, хотя их продукты — выведенные из круговорота отходы обмена микроорганизмов, как, впрочем, и сами газы атмосферы» (с.183—184).

В коротком заключении Георгий Александрович, акцентируя читателя на основной цели своей работы — попытке донести мысль, что именно сообщество микроорганизмов было ключевым фактором в формировании условий на поверхности Земли, polemизирует с Дж.Е.Ловелоком (1979). Тот, как известно, постулировал, что физические и химические условия на поверхности Земли, в атмосфере и в океане как в прошлом, так и в настоящем были активно созданы жизнью приспособленными и комфортабельными для себя. Заварзин не нашел в его работе новизны. Мало того, он обращает внимание на то, что, говоря об атмосфере и ее взаимодействиях, иностранные исследователи фактически проигнорировали гипотезу, высказанную В.И.Вернадским еще в 1926 г.: «Генетическая связь жизни с газами биосферы чрезвычайно велика. Она даже глубже, чем это с первого взгляда кажется. Газы биосферы всегда генетически связаны с живым веществом, и земная атмосфера им определяется в своем основном химическом составе». Можно смело сказать, что это гениальное эмпирическое предположение великого геохимика блестяще обосновал в рецензированной книге микробиолог с большой

буквы — Георгий Александрович Заварзин. В его понимании биосфера Земли — это целостная экосистема, где биотические и геологические факторы функционируют в тесном взаимодействии.

В завершение рецензии хочется немного сказать и о самом авторе книги. Георгий Александрович безусловно принадлежит к плеяде выдающихся ученых современности. Мне приходилось встречаться и работать с ним в разных условиях — в его рабочем кабинете в Институте микробиологии РАН им.С.Н.Виноградского и в горах Камчатки. И всегда поражала прежде всего его удивительная интеллигентность, порядочность и обязательность. Прямой наследник и продолжатель в науке своего деда по материнской линии, академика Б.Л.Исаченко, и дяди, тоже академика, А.А.Заварзина — академик РАН Заварзин был образцом в высшей степени целеустремленного ученого и культурного человека. Круг его научных интересов был чрезвычайно разнообразен. Он постоянно общался с геологами, геохимиками, палеонтологами, вулканологами, имел в этих науках соответствующие знания, что и позволило ему выполнить ряд прорывных исследований — как по специальности, так и междисциплинарного характера. Среди них в первую очередь следует отметить изучение экстремофильных бактериальных сообществ. Георгий Александрович не только вызвал уважение и признательность своих и зарубежных коллег рядом приоритетных работ в этой области, но и сумел сделать основополагающие выводы и создать несколько новых направлений научных исследований, которые продолжают в настоящее время его ученики.

Хочется вспомнить два эпизода из совместных работ на

Камчатке, где особенно проявились характерные для Заварзина качества ученого. Так, еще в 60-х годах мы с ним предприняли поход на так называемую вторую группу Южно-Камбальных термальных источников. От пос.Паужетка пришлось довольно долго идти в гору. Рюкзаки наши были набиты полевым снаряжением и продуктами. Каждый грамм, как говорится, был на учете. Было то жарко, то шел дождь, и мы только под вечер следующего дня, после ночевки на промежуточном лагере, с трудом добрались до цели. Каково же было мое удивление, когда я увидел, что Георгий Александрович достал из рюкзака тяжеленный микроскоп. В тот раз он показал мне, как выглядят под микроскопом обнаруженные им на источниках термофильные бактерии. Тот урок чрезвычайного трудолюбия и стремления как можно лучше сделать свою работу запомнился мне на всю жизнь. Второй экстраординарный случай чуть было не окончился трагически. Уже в 80-х годах мы решили обследовать легендарную Долину смерти, которая находится севернее известной теперь всему миру Долины гейзеров. Надо было отобрать пробы газа, воздуха, осадков в зоне гибели животных. Я уже работал ранее в этих местах и знал, что опасная для дыхания зона располагается не выше 0.5 м над землей. Сказал об этом идущему за мной Георгию Александровичу и предупредил, чтобы он не останавливался и не наклонялся, пока мы не дойдем до замеченного мной большого камня — на него мы положим наши рюкзаки и там же наденем противогазы для работы. Шли гуськом. Разговаривали. Заварзин какое-то время отвечал мне. Но вдруг я понял, что он замолчал. Оглядываюсь. Георгий Александрович стоит на коленях метрах в десяти от меня. Подбегаю

и вижу, как он старательно заворачивает в крафт-бумагу резиновую пробку от стоявшей рядом бутылочки. «Что вы делаете, Георгий Александрович?» — буквально кричу я. Он отвечает медленно: «Отбираю пробу». Я понял, что он уже немного «траванулся». Схватил его, резко поднял с колен и потащил на ближний бугор. Мой спутник судорожно хватается ртом воздух. Когда он отдышался, то с воодушевлением сказал: «Все, теперь мы братья. Зови меня просто Егор». И потом уже долго не снимал противогаз, хотя мы и вышли из опасной зоны. Помнится, в тот раз мы по его предложению непосредственно на поле устроили мозговую штурм. Искали конкретную причину гибели животных. Хотя мы сразу предположили, что это газ, но не знали, какой точно и где он сосредоточен. Вокруг было много зон осернения. Опробовав термальное поле, мы вышли на максимум содержания в выходах газов такого удушающего компонента, как сероводород. Именно к этим выходам были приурочены трупы животных (медведей, лис и даже птиц). Так было сделано это своеобразное открытие.

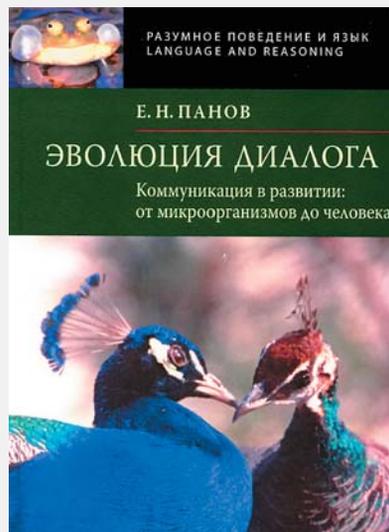
Книга Заварзина «Бактерии и атмосфера» выдержала уже второе издание и, безусловно, будет весьма полезной для широкого круга специалистов в области естественных наук о Земле. Высокая научная ценность текстовой части книги органично дополняется многочисленными таблицами, графиками, схемами, объясняющими характерные геохимические реакции и микробиологические процессы. Выдержанность темы, ясность и четкая логика рассуждений, высокая степень обоснованности выдвигаемых положений делают эту книгу особенно ценной для студентов и аспирантов, специализирующихся в микробиологии. ■

**Этология**

**Е.Н.Панов.** ЭВОЛЮЦИЯ ДИАЛОГА. КОММУНИКАЦИЯ В РАЗВИТИИ: ОТ МИКРООРГАНИЗМОВ ДО ЧЕЛОВЕКА. М.: Языки славянских культур, 2014. 404 с.

В книге рассмотрена та сторона поведения животных, которая обеспечивает обмен информацией между особями одного вида, и прослежены эволюционные преобразования механизмов трансляции и приема сигналов по всем каналам связи: химическому, тактильному, оптическому и акустическому. В начале каждой главы описываются животные, стоящие у основания филогенетического древа. Затем показано, как коммуникация меняется с увеличением сложности и эффективности морфологических инструментов генерации сигналов и их восприятия. Последняя глава посвящена коммуникации в человеческом обществе, что выводит весь предшествующий материал на новый, междисциплинарный уровень — острой современной дискуссии о происхождении речи и языка.

Соблазн видеть в сигналах, которыми обмениваются животные, некое подобие речи присущ не только обыденному сознанию, но и представителям некоторых научных школ. Между тем, язык человека и так называемые «языки» животных сходны лишь в одном своем назначении — средство общения, коммуникации. Но наш язык — еще и главный инструмент мышления и познания окружающего мира. Эта важнейшая идея последовательно проводится в последней главе книги.

**Космонавтика**

**М.Я.Маров, У.Т.Хантресс.** СОВЕТСКИЕ РОБОТЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ. ТЕХНОЛОГИИ И ОТКРЫТИЯ. М.: Физматлит, 2013. 612 с.



Программа космических исследований в СССР осуществлялась в первые десятилетия космической эры в обстановке холодной войны и жесткой конкуренции с США за обладание ведущими позициями в мире. Этот период отмечен выдающимися свершениями, достигнутыми благодаря исключительному таланту советских ученых и инженеров, которые создали замечательные космические аппараты-роботы и получили результаты мирового значения.

Эта книга первоначально вышла в 2011 г. на английском языке в издательстве «Springer-Praxis», в том же году она удостоилась премии Международной академии астронавтики за лучшую публикацию в области фундаментальных наук. Русский вариант полностью повторяет английский и дополнен информацией о проекте «Фобос-Грунт», запущенном после выхода в свет английского издания. Книга содержит хронологически исчерпывающий и объективный анализ не только достижений, но и сложностей и неудач при осуществлении технических проектов на фоне советско-американского соперничества. Авторы приводят наиболее полное техническое описание советских лунно-планетных космических аппаратов, дают уникальный анализ программ исследований, технических решений и сценариев полетов, рассматривают вопросы планирования космических миссий, достигнутые результаты и причины неудач.

# Тематический указатель за 2014 год

## ФИЛОСОФИЯ И ИСТОРИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ НАУКИ

Х Международный конгресс по экстремофилам.	
<b>Бонч-Осмоловская Е.А.</b>	11 84
Александр Григорьевич Столетов.	
К 175-летию со дня рождения. <b>Щербаков Р.Н.</b>	9 60
В.А.Энгельгардт и А.А.Баев в науке и в жизни.	
<b>Поляновский О.Л.</b>	8 60
<b>ВСПОМИНАЯ Я.Б.</b>	
К 100-летию академика Зельдовича <sup>1</sup>	6 63
Человек универсальных результатов.	
<b>Герштейн С.С.</b>	6 65
Человек осведомленный. <b>Халатников И.М.</b>	6 68
Наставник молодежи. <b>Комберг Б.В.</b>	6 74
Гамма-мониторинг космоса.	
<b>Бисноватый-Коган Г.С.</b>	6 80
Две жизни В.Ю.Гаврилова. <b>Богданова С.Л.</b>	11 64
Дэвид Лэк: две версии видообразования. <b>Галл Я.М.</b>	7 59
К новой парадигме геологии. <b>Кузьмин М.И.</b>	7 49
Как возникла наука о сне.	
<b>Завалко И.М., Ковальзон В.М.</b>	3 53
	4 55
Конференция «Лженаука в современном мире».	
<b>Латыпов И.В.</b>	9 73
Кто изобрел радар? Из истории изобретений русского физика Г.В.Потапенко в Америке.	
<b>Каминский Ф.В.</b>	4 81
Лауреат премии Абеля 2014 г. — Я.Г.Синай.	
<b>Ильяшенко Ю.С.</b>	6 85
<b>ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2013 ГОДА</b>	1 73
По физике — Ф.Энглер и П.Хиггс. <b>Рубаков В.А.</b>	1 73
По химии — М.Карплус, М.Левитт и А.Уоршел.	
<b>Атауллаханов Ф.И.</b>	1 79
По физиологии или медицине — Дж.Ротман, Р.Шекман и Т.Зюдоф. <b>Корнилова Е.С.</b>	1 83
<b>МАГИЯ КРИСТАЛЛОВ</b>	
К 150-летию со дня рождения Г.В.Вульфа	10 52
Как растут кристаллы. <b>Вульф Г.В.</b>	10 53
Выращиваем кристаллы. <b>Волошин А.Э.,</b>	
<b>Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л.</b>	10 62
Георгий Викторович Вульф.	
<b>Маслов А.А., Чернова Е.В., Щербаков В.М.</b>	10 73
Международная конференция «Терапия будущего».	
<b>Серов О.Л.</b>	8 66
Международный год кристаллографии стартовал!	
На пути к телескопу Ломоносова.	
<b>Нестеренко И.Н., Нестеренко А.Р.</b>	5 27

<sup>1</sup> Публикация А.В.Бялко.

Научное творчество и возраст исследователя.	
<b>Холодов В.Н.</b>	12 55
Палеонтологические музейные коллоквиумы.	
Новая форма взаимодействия науки и музеев.	
<b>Наугольных С.В.</b>	6 53
Письма Н.А.Рубакина к И.П.Павлову. <b>Громова Л.И.</b>	9 67
Плавания В.Баренца в свете космической информации.	
<b>Корякин В.С.</b>	2 64
Спорово-пыльцевой анализ: история становления.	
<b>Сафарова С.А.</b>	6 58
Спорово-пыльцевой анализ: применение.	
<b>Сафарова С.А.</b>	10 47
Судьба первых советских геофизиков. <b>Костицын В.И.</b>	3 61
Триада творчества великого Галилея.	
К 450-летию со дня рождения. <b>Щербаков Р.Н.</b>	2 71

## АСТРОНОМИЯ. АСТРОФИЗИКА. КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Космическая защита Земли: первый эксперимент.	
<b>Александров П.А., Горев В.В.</b>	5 7
Космологические гравитационные волны открыты?	
<b>Сажин М.В., Сажина О.С.</b>	9 11
На пути к телескопу Ломоносова. <b>Нестеренко И.Н.,</b>	
<b>Нестеренко А.Р.</b>	5 27
Экзопланеты. <b>Маров М.Я., Шевченко И.И.</b>	6 3

## ПЛАНЕТОЛОГИЯ. МЕТЕОРИТИКА. ФИЗИКА И ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ. КОСМОХИМИЯ

Арктическая дымка и атмосферные осадки.	
<b>Свистов П.Ф., Павлова М.Т.</b>	10 18
Атмосферные осадки над городами и регионами России. <b>Свистов П.Ф., Полищук А.И.</b>	3 28
Метеоритный ливень над Уралом. <b>Назаров М.А.</b>	5 3

## МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА

Лауреат премии Абеля 2014 г. — Я.Г.Синай.	
<b>Ильяшенко Ю.С.</b>	6 85

## ФИЗИКА. ТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

Александр Григорьевич Столетов.	
К 175-летию со дня рождения. <b>Щербаков Р.Н.</b>	9 60
<b>ГРАВИТАЦИЯ — ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА ИЛИ ФИЗИЧЕСКОЕ ПОЛЕ?</b>	4 3
О новом развитии теории гравитации.	
<b>Герштейн С.С.</b>	4 3
Релятивистская теория гравитации: новые результаты. <b>Логунов А.А.</b>	4 6
Лазеры вместо скальпеля. <b>Кочнев Д.Г., Щербаков И.А.</b>	3 3

Микротомография — взгляд в невидимое.

**Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Золотов Д.А., Якимчук И.В.** 2 9

## КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Комбинаторика и прочность стали.

**Крапошин В.С., Талис А.Л.** 12 3

### КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ЗНАКОМАЯ И НЕЗНАКОМАЯ

К Международному году кристаллографии 1 42

Предыстория Института кристаллографии АН СССР.

**Щагина Н.М.** 1 43

Минералогия в физическом институте.

**Расцветаева Р.К.** 1 52

Что видит атомно-силовой микроскоп?

**Толстихина А.Л., Сорокина К.Л.,**

**Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В.** 1 62

Кристаллография и вещество.

**Крапошин В.С., Талис А.Л.** 11 3

Кристаллы для изучения белковых структур.

**Куранова И.П., Ковальчук М.В.** 3 12

### МАГИЯ КРИСТАЛЛОВ

К 150-летию со дня рождения Г.В.Вульфа 10 52

Как растут кристаллы. **Вульф Г.В.** 10 53

Выращиваем кристаллы. **Волошин А.Э.,**

**Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л.** 10 62

Георгий Викторович Вульф.

**Маслов А.А., Чернова Е.В., Щербаков В.М.** 10 73

Международный год кристаллографии стартовал!

Хикикомория. **Расцветаева Р.К.** 4 68

## ХИМИЯ

Как смешать полимеры? **Волынский А.Л.** 3 44

## БИОЛОГИЯ

Дэвид Лэк: две версии видообразования. **Галл Я.М.** 7 59

Как общаются амфибии. **Панов Е.Н.** 12 37

Как паразиты манипулируют своими хозяевами.

**Борисов Б.А., Дьяков Ю.Т.** 6 22

Непрощенный гость — лисица на острове Тюленьем.

**Кузин А.Е.** 1 38

Оляпка: жизнь пернатого водолаза. **Колбин В.А.** 2 82

Полосатая аргиопа движется на север.

**Михайлов К.Г., Панов Е.Н.** 7 73

## БОТАНИКА. ЗООЛОГИЯ.

### МИКРОБИОЛОГИЯ

Бактерия *Wolbachia* — «серый кардинал» мира насекомых.

**Струнов А.А., Жукова М.В., Малькеева Д.А.,**

**Киселева Е.В.** 12 22

Доместикация пшениц.

**Гончаров Н.П., Сормачева И.Д.** 2 45

Загадка амурского хариуса.

**Антонов А.Л., Книжник И.Б.** 1 31

Мамонтовый крот с Колымы.

**Берман Д.И., Никольский П.А.** 4 64

Орнитологи в краю народа туцзя. **Самоцкая В.В.** 8 54

Птица в муравейнике. **Морозов Н.С.** 7 43

Рай для ботаника. **Бебия С.М.** 4 38

Редкая встреча моржа в Белом море.

**Сухотин А.А., Бергер В.Я., Наумов А.Д.** 3 71

Русские имена в названиях азиатских лягушек.

**Ананьева Н.Б., Орлов Н.Л., Боур Р.** 8 20

Тибет: последняя пастораль Земли. **Коблик Е.А.,**

**Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И.,**

**Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.** 5 78

Эволюционные метаморфозы туникат.

**Иванова-Казас О.М.** 5 36

## ГЕНЕТИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ. БИОХИМИЯ. БИОФИЗИКА. БИОТЕХНОЛОГИЯ. БИОИНФОРМАТИКА

CRISPR-системы: структура и гипотетические функции.

**Гоглева А.А., Артамонова И.И.** 6 16

CRISPR-системы: механизм действия и применения.

**Гоглева А.А., Артамонова И.И.** 7 3

Алгебра и гармония в песне восточного соловья.

**Иваницкий В.В., Марова И.М., Антипов В.А.** 2 18

Биоломинесценция: возрождение. **Ямпольский И.В.,**

**Царькова А.С., Дубинный М.А., Петушков В.Н.,**

**Родионова Н.С.** 7 10

В.А.Энгельгардт и А.А.Баев в науке и в жизни.

**Поляновский О.Л.** 8 60

Доместикация пшениц.

**Гончаров Н.П., Сормачева И.Д.** 2 45

Клеточные механизмы восприятия вкуса.

**Романов Р.А.** 8 3

Метилирование ДНК и поведение.

**Гербек Ю.Э., Хантемирова С.Р.** 12 30

Новые технологии в золотодобывающей отрасли.

**Сергеев А.В., Смолянинов В.В.** 11 37

О молекулярных механизмах возникновения опухолей.

**Киселев Ф.Л.** 4 12

О чем говорили наши далекие предки.

**Березкин Ю.Е., Боринская С.А.** 12 48

От науки к интернет-играм: коллективное решение

биоинформатических задач. **Гельфанд М.С.** 11 32

Поверхность молекулы — источник биологической

информации. **Чугунов А.О., Ефремов Р.Г.** 10 3

Портрет Y-хромосомы в юности.

**Бородин П.М., Лисачев А.П.** 11 23

Прионы и амилоиды: ключевые свойства

и роль в природе. **Кушниров В.В.** 3 37

Стремительная эволюция гриппа: как одни изменения

влекут за собой другие. **Базыкин Г.А.,**

**Стефанов Ю.Э.** 11 16

Этот загадочный тромбоцит. **Якименко А.О.,**

**Свешникова А.Н., Артеменко Е.О., Пантелеев М.А.** 2 3

## ФИЗИОЛОГИЯ. ПСИХОЛОГИЯ. МЕДИЦИНА. ДЕМОГРАФИЯ. СОЦИОЛОГИЯ

Как возникла наука о сне.

**Завалко И.М., Ковальзон В.М.** 3 53

4 55

Лазеры вместо скальпеля. **Кочиев Д.Г., Щербаков И.А.** 3 3

Продолжительность жизни ученых различных

специальностей. **Анисимов В.Н., Жаринов Г.М.** 5 48

Стремительная эволюция гриппа: как одни изменения

влекут за собой другие. **Базыкин Г.А., Стефанов Ю.Э.** 11 16

Эндотелий и оксид азота.

**Гайнуллина Д.К., Софронова С.И., Тарасова О.С.** 9 3

## **ЭКОЛОГИЯ. ОХРАНА ПРИРОДЫ. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Бессмертен ли кедровый стланик?		
<b>Берман Д.И., Важенин Б.П.</b>	9	34
Криоконсервация и сохранение биоразнообразия.		
<b>Амстиславский С.Я., Абрамова Т.О., Брусенцев Е.Ю., Кизилова Е.А.</b>	9	24
Морские исследования у берегов Абхазии.		
<b>Матишов Г.Г., Степаньян О.В.</b>	11	70
На берегах разноцветного озера. <b>Рижинашвили А.Л.</b>	12	76
Пионово́я тайга. <b>Смирнова О.В., Алейников А.А., Смирнов Н.С., Луговая Д.Л.</b>	2	54
Происхождение чумы: экологический сценарий.		
К 120-летию открытия А.Йерсеном и Ш.Китазато микроба чумы <i>Yersinia pestis</i> . <b>Сунцов В.В.</b>	1	3
Реинтродукция, репатриация, реставрация... и урбанизация. <b>Беднова О.В.</b>	10	27

## **ГЕОЛОГИЯ. ГЕОТЕКТЕНИКА**

Байкальский рифт: на пути к океану.		
<b>Мац В.Д., Гранина Л.З., Ефимова И.М.</b>	2	28
Заповедные уголки Западной Австралии.		
<b>Анжелетт Дж.</b>	11	79
Как сохранить Мертвое море? <b>Танклевский М.М.</b>	8	49
Мифы как отражение жизни соляных недр Мертвого моря. <b>Беленицкая Г.А.</b>	1	24
Нефть и газ Волгоградского Поволжья. <b>Пряхин С.И.</b>	5	16
Новые технологии в золотодобывающей отрасли.		
<b>Сергеев А.В., Смолянинов В.В.</b>	11	37
Пещера Прометея в Западной Грузии. <b>Матвиенко Е.Н., Поваренных М.Ю.</b>	3	74
Современные травертины в районе Санкт-Петербурга.		
<b>Колокольцев В.Г., Никитин М.Ю., Ковалевская Е.О.</b>	7	17
Уникальные рудные геологические объекты Дашкесанского прогиба. <b>Исмаил-Заде А.Д.</b>	10	11

## **ГЕОХИМИЯ. МИНЕРАЛОГИЯ. КРИСТАЛЛОХИМИЯ**

И в минералах каналы бывают «сухими».		
<b>Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.</b>	7	79
Многоликие кремни. <b>Комаров В.Н.</b>	3	84

## **ГЕОФИЗИКА**

Момент импульса атмосферы. <b>Сидоренков Н.С., Бизуар К., Зотов Л.В., Салстейн Д.</b>	4	22
Судьба первых советских геофизиков. <b>Костицын В.И.</b>	3	61

## **СЕЙСМОЛОГИЯ. ВУЛКАНОЛОГИЯ**

Колебания уровня моря в голоцене: взгляд с Камчатки. <b>Пинегина Т.К.</b>	6	32
Ужасное событие, случившееся в 1888 году в селе Кашкаранцы. <b>Евзеров В.Я.</b>	5	74

## **ГЕОГРАФИЯ. КЛИМАТОЛОГИЯ. МЕТЕОРОЛОГИЯ. ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Верный. История катастроф.		
<b>Горбунов А.П., Горбунова И.А.</b>	4	50
Вечная мерзлота в долине реки Кючюс. <b>Мурзин Ю.А.</b>	2	39
Возрождение острова Васильевского. <b>Гуков А.Ю.</b>	5	70

Древние волокна — уникальные памятники освоения Севера. <b>Коростелев Е.М., Зелюткина Л.О., Севастьянов Д.В.</b>	4	29
Камни на дне Северного Ледовитого океана.		
<b>Гусев Е.А.</b>	8	31
Морские исследования у берегов Абхазии.		
<b>Матишов Г.Г., Степаньян О.В.</b>	11	70
Наводнение 2012 года на побережье Черного моря: анализ последствий. <b>Борисов Д.Г., Зырянова М.И., Евсюков Ю.Д.</b>	8	39
Новый «Казбекский завал» 17 мая 2014 года.		
<b>Черноморец С.С.</b>	7	67
Паратуризм в заповедниках России.		
<b>Андреева И.В.</b>	6	38
Плавание В.Баренца в свете космической информации. <b>Корякин В.С.</b>	2	64
Топонимы Центральной Азии. <b>Горбунов А.П.</b>	7	30
Устья рек Байкала. <b>Потемкина Т.Г.</b>	12	13
Что происходит с ледниками Северной Земли?		
<b>Корякин В.С.</b>	11	42

## **ОКЕАНОЛОГИЯ**

Загрязнение морских акваторий при добыче нефти.		
<b>Немировская И.А.</b>	3	22
Исследование морей Российской Арктики: мыслим процессами. <b>Леин А.Ю.</b>	8	11
Меловые аноксические события в Тихом океане.		
<b>Савельева О.Л.</b>	9	17
Метаногенный карбонат со дна Карского моря.		
<b>Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т.</b>	12	66

## **ПАЛЕОНТОЛОГИЯ. ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ. ПАЛЕОКЛИМАТОЛОГИЯ**

Мамонтовый крот с Колымы.		
<b>Берман Д.И., Никольский П.А.</b>	4	64
Маньч: история древних проливов. <b>Свиточ А.А.</b>	1	15

## **АРХЕОЛОГИЯ. АНТРОПОЛОГИЯ. ЭТНОГРАФИЯ**

Античные древности Анапы. История Горгиппии.		
<b>Алексеева Е.М.</b>	10	36
Город древних земледельцев в Северо-Западной Монголии. <b>Прудникова Т.Н.</b>	12	69
Кочевой мир Евразии: структура и динамика развития. <b>Черных Е.Н.</b>	9	48
О славянской колонизации Подмосковья.		
<b>Кренке А.Н., Кренке Н.А.</b>	6	48
О чем говорили наши далекие предки.		
<b>Березкин Ю.Е., Боринская С.А.</b>	12	48
Что ели москвичи в эпоху Средневековья.		
<b>Панова Т.Д.</b>	8	43

## **АПРЕЛЬСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ**

Мамонтовый крот с Колымы.		
<b>Берман Д.И., Никольский П.А.</b>	4	64
Хикикомория. <b>Расцветаева Р.К.</b>	4	68

## **БИОГРАФИЯ СОВРЕМЕННОГО**

Две жизни В.Ю.Гаврилова. <b>Богданова С.Л.</b>	11	64
--	----	----

## ОН «ОТКРЫВАЛ ГЛАЗА ДУШИ»

Валерий Иванович Булавинцев	1	88
Искренний и естественный в мыслях и действиях. <b>Васильева Н.П.</b>	1	89
Страстный фотоохотник. <b>Забугин В.В.</b>	1	90
<b>РОВЕСНИЦЫ «ПРИРОДЫ»</b>	5	54
Эмбриолог О.М.Иванова-Казас <sup>2</sup>	5	54
Почвовед и геохимик М.А.Глазовская <sup>3</sup>	5	62

## В КОНЦЕ НОМЕРА

Как «ослеп» Гомер. <b>Портнов А.М.</b>	2	92
Нептунизм и плутонизм — истоки учений. <b>Кузнецов В.Г.</b>	6	94
Опасные дыры Земли. <b>Портнов А.М.</b>	11	94
Размышления над старой фотографией. <b>Флоренский П.В.</b>	9	93
Ртуть — грозный убийца. <b>Портнов А.М.</b>	10	93
Самогон изобрели славяне! <b>Портнов А.М.</b>	4	95

## ВЕСТИ ИЗ ЭКСПЕДИЦИЙ

Город древних земледельцев в Северо-Западной Монголии. <b>Прудникова Т.Н.</b>	12	69
Морские исследования у берегов Абхазии. <b>Матишов Г.Г., Степаньян О.В.</b>	11	70
Тибет: последняя пастораль Земли. <b>Коблик Е.А., Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.</b>	5	78

## ВСТРЕЧИ С ЗАБЫТЫМ

Анна Миссуна — геолог и педагог. Новые материалы к биографии. <b>Любина Г.И.</b>	8	84
Биология в зеркале карикатуры. <b>Фандо Р.А.</b>	7	87
Первая мировая война в записках А.С.Серебровского. <b>Фандо Р.А.</b>	9	84

## ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

Заповедные уголки Западной Австралии. <b>Анжелетт Дж.</b>	11	79
На берегах разноцветного озера. <b>Рижинашвили А.Л.</b>	12	76
Оляпка: жизнь пернатого водолаза. <b>Колбин В.А.</b>	2	82
Орнитологи в краю народа туцзя. <b>Самоцкая В.В.</b>	8	54
Пещера Прометея в Западной Грузии. <b>Матвиенко Е.Н., Поваренных М.Ю.</b>	3	74

## КРАСНАЯ КНИГА

Редкая встреча моржа в Белом море. <b>Сухотин А.А., Бергер В.Я., Наумов А.Д.</b>	3	71
--	---	----

## НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Возрождение острова Васильевского. <b>Гуков А.Ю.</b>	5	70
Загадка амурского хариуса. <b>Антонов А.Л., Книжин И.Б.</b>	1	31
И в минералах каналы бывают «сухими». <b>Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.</b>	7	79
Метаногенный карбонат со дна Карского моря. <b>Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т.</b>	12	66
Многоликие кремни. <b>Комаров В.Н.</b>	3	84

<sup>2</sup> Публикация М.И.Герасимовой.

<sup>3</sup> Публикация А.В.Чернышева.

Наводнение 2012 года на побережье Черного моря: анализ последствий. <b>Борисов Д.Г., Зырянова М.И., Евсегов Ю.Д.</b>	8	39
Непрощеный гость — лисица на острове Тюленьем. <b>Кузин А.Е.</b>	1	38
Новый «Казбекский завал» 17 мая 2014 года. <b>Черноморец С.С.</b>	7	67
Полосатая аргиопа движется на север. <b>Михайлов К.Г., Панов Е.Н.</b>	7	73
Ужасное событие, случившееся в 1888 году в селе Кашкаранцы. <b>Евзеров В.Я.</b>	5	74
Что ели москвичи в эпоху Средневековья. <b>Панова Т.Д.</b>	8	43

## НОВОСТИ НАУКИ

Международный год кристаллографии стартовал!

## НОВЫЕ КНИГИ

1 95; 2 90; 4 94; 5 94; 6 92; 7 84; 8 81; 9 83; 10 90; 11 92

## РЕДАКЦИОННАЯ ПОЧТА

Контурсы протоэволюции. <b>Хлебович В.В.</b>	8	93
--	---	----

## РЕЗОНАНС

Как сохранить Мертвое море? <b>Танклевский М.М.</b>	8	49
---	---	----

## РЕКЛАМА, ОБЪЯВЛЕНИЯ

8 95; 9 79

## РЕЦЕНЗИИ

Бактериальный газовый фильтр (на кн.: Г.А.Заварзин. Бактерии и состав атмосферы). <b>Карпов Г.А.</b>	12	81
Велик ли вред морю от нефти? (на кн.: И.А.Немировская. Нефть в океане: Загрязнение и природные потоки). <b>Коробов В.Б.</b>	7	82
Естественная история и история Отечества (на кн.: Приключение жизни Викторова Ивановича Мочульского). <b>Михайлов К.Г.</b>	2	87
За честную археологию (на кн.: Русь в IX—X веках: археологическая панорама). <b>Кренке Н.А., Стрикалов И.Ю.</b>	9	80
Книга о Моцарте биологии (на кн.: Я.М.Галл. Георгий Францевич Гаузе). <b>Голубовский М.Д.</b>	8	73
Лучше меньше да лучше! Какие фотоальбомы о природе хотелось бы видеть? (на кн.: В.Г.Малеев. Птицы России). <b>Михайлов К.Е.</b>	3	88
Ньютон и Монетный двор. Ученый как очень эффективный менеджер (на кн.: Т.Левенсон. Ньютон и фальшивомонетчик. О том, как величайший ученый стал сыщиком). <b>Менцин Ю.Л.</b>	4	90
Поиски потомков Великого монгола (на кн.: И.А.Захаров-Гезехус. По следам Чингиз-хана. Генетик в центре Азии). <b>Фандо Р.А.</b>	6	90
Рукописи не горят (на кн.: Н.И.Вавилов. Этюды по истории генетики). <b>Асланян М.М.</b>	5	89
Эволюция сквозь призму геномики (на кн.: Е.В.Кунин. Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции). <b>Боринская С.А.</b>	10	80

# Авторский указатель за 2014 год

<b>А</b> брамова Т.О. (Амстиславский С.Я., Брусенцев Е.Ю., Кизилова Е.А.)	9	24	Беднова О.В.	10	27	Герштейн С.С.	4	3
Аксенов С.М. (Расцветаева Р.К.)	7	79	Беленицкая Г.А.	1	24	Гоглева А.А. (Артамонова И.И.)	6	65
Алейников А.А. (Смирнова О.В., Смирнов Н.С., Луговая Д.Л.)	2	54	Белугина Н.В. (Толстихина А.Л., Сорокина К.Л., Гайнутдинов Р.В.)	1	62	Голубовский М.Д.	7	3
Александров Д.Ю. (Коблик Е.А., Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С.)	5	78	Бергер В.Я. (Сухотин А.А., Наумов А.Д.)	3	71	Гончаров Н.П. (Сормачева И.Д.)	8	73
Александров П.А. (Горев В.В.)	5	7	Березкин Ю.Е. (Боринская С.А.)	12	48	Горбунов А.П. (Горбунова И.А.)	2	45
Алексеева Е.М.	10	36	Берман Д.И. (Важенин Б.П.)	9	34	Горбунов А.П.	4	50
Амстиславский С.Я. (Абрамова Т.О., Брусенцев Е.Ю., Кизилова Е.А.)	11	50	Берман Д.И. (Никольский П.А.)	4	64	Горбунова И.А. (Горбунов А.П.)	7	30
Ананьева Н.Б. (Орлов Н.Л., Боур Р.)	8	20	Бизуар К. (Сидоренков Н.С., Зотов Л.В., Салстейн Д.)	4	22	Горбунова И.А. (Горбунов А.П.)	4	50
Андреева И.В.	6	38	Бисноватый-Коган Г.С.	4	22	Горев В.В. (Александров П.А.)	5	7
Анжелетт Дж.	11	79	Бобров В.В. (Коблик Е.А., Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.)	6	80	Гранина Л.З. (Мац В.Д., Ефимова И.М.)	2	28
Анисимов В.Н. (Жаринов Г.М.)	5	48	Богданова С.Л.	5	78	Громова Л.И.	9	67
Антипов В.А. (Иваницкий В.В., Марова И.М.)	2	18	Бонч-Осмоловская Е.А.	11	64	Гуков А.Ю.	5	70
Антонов А.Л. (Книжин И.Б.)	1	31	Боринская С.А. (Березкин Ю.Е.)	11	84	Гусев Е.А.	8	31
Артамонова В.С. (Коблик Е.А., Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Александров Д.Ю.)	5	78	Боринская С.А.	12	48	<b>Д</b> убинный М.А. (Ямпольский И.В., Царькова А.С., Петушков В.Н., Родионова Н.С.)	7	10
Артамонова И.И. (Гоглева А.А.)	6	16	Борисов Б.А. (Дьяков Ю.Т.)	10	80	Дубинчук В.Т. (Батурин Г.Н.)	12	66
Артемко Е.О. (Якименко А.О., Свешникова А.Н., Пантелеев М.А.)	7	3	Борисов Д.Г. (Зырянова М.И., Евсюков Ю.Д.)	6	22	Дьяков Ю.Т. (Борисов Б.А.)	6	22
Асадчиков В.Е. (Бузмаков А.В., Золотов Д.А., Якимчук И.В.)	2	9	Бородин П.М. (Лисачев А.П.)	8	39	<b>Е</b> взеров В.Я.	5	74
Асланян М.М.	5	89	Боур Р. (Ананьева Н.Б., Орлов Н.Л.)	11	23	Евсюков Ю.Д. (Борисов Д.Г., Зырянова М.И.)	8	39
Атауллаханов Ф.И.	1	79	Брусенцев Е.Ю. (Амстиславский С.Я., Абрамова Т.О., Кизилова Е.А.)	8	20	Ефимова И.М. (Мац В.Д., Гранина Л.З.)	2	28
<b>Б</b> азыкин Г.А. (Стефанов Ю.Э.)	11	16	Бузмаков А.В. (Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Якимчук И.В.)	2	9	Ефремов Р.Г. (Чугунов А.О.)	10	3
Банникова А.А. (Коблик Е.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.)	5	78	<b>В</b> аженин Б.П. (Берман Д.И.)	9	34	<b>Ж</b> аринов Г.М. (Анисимов В.Н.)	5	48
Батурин Г.Н. (Дубинчук В.Т.)	12	66	Васильева Н.П.	9	24	Жукова М.В. (Струнов А.А., Малькеева Д.А., Киселева Е.В.)	12	22
Бегия С.М.	4	38	Волошин А.Э. (Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л.)	1	89	<b>З</b> абугин В.В.	1	90
			Вольнский А.Л.	10	62	Завалко И.М. (Ковальзон В.М.)	3	53
			Вульф Г.В.	3	44		4	55
			<b>Г</b> айнуллина Д.К. (Софронова С.И., Тарасова О.С.)	10	53	Зелюткина Л.О. (Коростелев Е.М., Севастьянов Д.В.)	1	90
			Гайнутдинов Р.В. (Толстихина А.Л., Сорокина К.Л., Белугина Н.В.)	9	3	Золотов Д.А. (Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Якимчук И.В.)	4	29
			Галл Я.М.	1	62	Зотов Л.В. (Сидоренков Н.С., Бизуар К., Салстейн Д.)	2	9
			Гельфанд М.С.	7	59	Зотов Л.В. (Сидоренков Н.С., Бизуар К., Салстейн Д.)	4	22
			Гербек Ю.Э. (Хантемиров С.Р.)	11	32	Зырянова М.И. (Борисов Д.Г., Евсюков Ю.Д.)	4	22
				12	30		8	39

\* Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

<b>И</b> ваницкий В.В. (Марова И.М., Антипов В.А.)	2	18	Маров М.Я. (Шевченко И.И.)	6	3	Рашкович Л.Н. (Волошин А.Э., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л.)	10	62
Иванова-Казас О.М.	5	36	Марова И.М. (Иваницкий В.В., Антипов В.А.)	2	18	Рижинашвили А.Л.	12	76
Ильяшенко Ю.С.	6	85	Маслов А.А.			Родионова Н.С. (Ямпольский И.В., Царькова А.С., Дубинный М.А., Петушков В.Н.)	7	10
Исмаил-Заде А.Д.	10	11	(Чернова Е.В., Щербаков В.М.)	10	73	Романов Р.А.	8	3
<b>К</b> аминский Ф.В.	4	81	Матвиенко Е.Н.	3	74	Рубаков В.А.	1	73
Карпов Г.А.	12	81	(Поваренных М.Ю.)	3	74	Руднева Е.Б. (Волошин А.Э., Рашкович Л.Н., Маноменова В.Л.)	10	62
Кизилова Е.А. (Амстиславский С.Я., Абрамова Т.О., Брусенцев Е.Ю.)	9	24	Матишов Г.Г. (Степаньян О.В.)	11	70	<b>С</b> авельева О.Л.	9	17
Киселев Ф.Л.	4	12	Махров А.А. (Коблик Е.А., Банникова А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.)	5	78	Сажин М.В. (Сажина О.С.)	9	11
Киселева Е.В. (Струнов А.А., Жукова М.В., Малькеева Д.А.)	12	22	Александров Д.Ю.)	5	78	Сажина О.С. (Сажин М.В.)	9	11
Книжин И.Б. (Антонов А.Л.)	1	31	Мац В.Д.			Салстейн Д. (Сидоренков Н.С., Бизуар К., Зотов Л.В.)	4	22
Коблик Е.А. (Банникова А.А., Махров А.А., Шефтель Б.И., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.)	5	78	(Гранина Л.З., Ефимова И.М.)	2	28	Самоцкая В.В.	8	54
Ковалевская Е.О.			Менцин Ю.Л.	4	90	Сафарова С.А.	6	58
(Колокольцев В.Г., Никитин М.Ю.)	7	17	Михайлов К.Г. (Панов Е.Н.)	7	73		10	47
Ковальзон В.М. (Завалко И.М.)	3	53	Михайлов К.Г.	2	87	Свешникова А.Н. (Якименко А.О., Артеменко Е.О., Пантелеев М.А.)	2	3
	4	55	Михайлов К.Е.	3	88	Свистов П.Ф. (Павлова М.Т.)	10	18
Ковальчук М.В. (Куранова И.П.)	3	12	Морозов Н.С.	7	43	Свистов П.Ф. (Полищук А.И.)	3	28
Колбин В.А.	2	82	Мурзин Ю.А.	2	39	Свиточ А.А.	1	15
Колокольцев В.Г. (Никитин М.Ю., Ковалевская Е.О.)	7	17	<b>Н</b> азаров М.А.	5	3	Севастьянов Д.В. (Коростелев Е.М., Зелюткина Л.О.)	4	29
Комаров В.Н.	3	84	Наугольных С.В.	6	53	Сергеев А.В. (Смолянинов В.В.)	11	37
Комберг Б.В.	6	74	Наумов А.Д.			Серов О.Л.	8	66
Корнилова Е.С.	1	83	(Сухотин А.А., Бергер В.Я.)	3	71	Сидоренков Н.С. (Бизуар К., Зотов Л.В., Салстейн Д.)	4	22
Коробов В.Б.	7	82	Немировская И.А.	3	22	Смирнов Н.С. (Смирнова О.В., Алейников А.А., Луговая Д.Л., Смирнова О.В. (Алейников А.А., Смирнов Н.С., Луговая Д.Л.)	2	54
Коростелев Е.М. (Зелюткина Л.О., Севастьянов Д.В.)	4	29	Нестеренко А.Р. (Нестеренко И.Н.)	5	27	Смирнов Н.С., Луговая Д.Л.)	2	54
Корякин В.С.	2	64	Нестеренко И.Н. (Нестеренко А.Р.)	5	27	Смолянинов В.В. (Сергеев А.В.)	11	37
	11	42	Никитин М.Ю. (Колокольцев В.Г., Ковалевская Е.О.)	7	17	Сормачева И.Д. (Гончаров Н.П.)	2	45
Костицын В.И.	3	61	Коробов В.Б.	7	82	Сорокина К.Л. (Толстихина А.Л., Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В.)	1	62
Кочиев Д.Г. (Щербаков И.А.)	3	3	Коростелев Е.М. (Зелюткина Л.О., Севастьянов Д.В.)	4	29	Софронова С.И. (Гайнуллина Д.К., Тарасова О.С.)	9	3
Крапошин В.С. (Талис А.Л.)	11	3	Корякин В.С.	2	64	Степаньян О.В. (Матишов Г.Г.)	11	70
	12	3	Костицын В.И.	3	61	Стефанов Ю.Э. (Базыкин Г.А.)	11	16
Кренке А.Н. (Кренке Н.А.)	6	48	Кочиев Д.Г. (Щербаков И.А.)	3	3	Стрикалов И.Ю. (Кренке Н.А.)	9	80
Кренке А.А. (Кренке А.Н.)	6	48	Крапошин В.С. (Талис А.Л.)	11	3	Струнов А.А. (Жукова М.В., Малькеева Д.А., Киселева Е.В.)	12	22
Кренке Н.А. (Стрикалов И.Ю.)	9	80		12	3	Сунцов В.В.	1	3
Кузин А.Е.	1	38	Крэнке А.Н. (Крэнке Н.А.)	6	48	Суходин А.А.		
Кузнецов В.Г.	6	94	Крэнке Н.А. (Стрикалов И.Ю.)	9	80	(Бергер В.Я., Наумов А.Д.)	3	71
Кузьмин М.И.	7	49	Кузин А.Е.	1	38	<b>Т</b> алис А.Л. (Крапошин В.С.)	11	3
Куранова И.П. (Ковальчук М.В.)	3	12	Кузнецов В.Г.	6	94		12	3
Кушниров В.В.	3	37	Кузьмин М.И.	7	49	Танклевский М.М.	8	49
			Куранова И.П. (Ковальчук М.В.)	3	12	Тарасова О.С. (Гайнуллина Д.К., Софронова С.И.)	9	3
<b>Л</b> атыпов И.В.	9	73	Кушниров В.В.	3	37	Толстихина А.Л. (Сорокина К.Л., Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В.)	1	62
Леин А.Ю.	8	11						
Лисачев А.П. (Бородин П.М.)	11	23	<b>О</b> рлов Н.Л.			<b>Ф</b> андо Р.А.	6	90
Логунов А.А.	4	6	(Ананьева Н.Б., Боур Р.)	8	20		7	87
Луговая Д.Л. (Смирнова О.В., Алейников А.А., Смирнов Н.С.)	2	54	<b>П</b> авлова М.Т. (Свистов П.Ф.)	10	18		9	84
Любина Г.И.	8	84	Панов Е.Н. (Михайлов К.Г.)	7	73			
<b>М</b> алькеева Д.А. (Струнов А.А., Жукова М.В., Киселева Е.В.)	12	22	Панов Е.Н.	12	37			
Маноменова В.Л. (Волошин А.Э., Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б.)	10	62	Панова Т.Д.	8	43			
			Пантелеев М.А. (Якименко А.О., Свешникова А.Н., Артеменко Е.О.)	2	3			
			Петушков В.Н. (Ямпольский И.В., Царькова А.С., Дубинный М.А., Родионова Н.С.)	7	10			
			Пинегина Т.К.	6	32			
			Поваренных М.Ю. (Матвиенко Е.Н.)	3	74			
			Полищук А.И. (Свистов П.Ф.)	3	28			
			Поляновский О.Л.	8	60			
			Портнов А.М.	2	92			
				4	95			
				10	93			
				11	94			
				12	13			
				12	69			
				5	16			
			<b>П</b> отемкина Т.Г.					
			Прудникова Т.Н.					
			Пряхин С.И.					
			<b>Р</b> асцветаева Р.К. (Аксенов С.М.)	7	79			
			Расцветаева Р.К.	1	52			
				4	68			

Флоренский П.В.	9	93	Черноморец С.С.	7	67	Щербаков В.М.		
<b>Х</b> алатников И.М.	6	68	Черных Е.Н.	9	48	(Маслов А.А., Чернова Е.В.)	10	73
Хантемиров С.Р. (Гербек Ю.Э.)	12	30	Чугунов А.О.	10	3	Щербаков И.А. (Кочиев Д.Г.)	3	3
Хлебович В.В.	8	93	(Ефремов Р.Г.)			Щербаков Р.Н.	2	71
Холодов В.Н.	12	55	<b>Ш</b> евченко И.И.				9	60
<b>Ц</b> арькова А.С. (Ямпольский И.В., Дубинный М.А., Петушков В.Н., Родионова Н.С.)	7	10	(Маров М.Я.)	6	3	<b>Я</b> кименко А.О. (Свешникова А.Н., Артеменко Е.О., Пантелеев М.А.)	2	3
<b>Ч</b> ернова Е.В. (Маслов А.А., Щербаков В.М.)	10	73	Шефтель Б.И. (Коблик Е.А., Банникова А.А., Махров А.А., Бобров В.В., Артамонова В.С., Александров Д.Ю.)	5	78	Якимчук И.В. (Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Золотов Д.А.)	2	9
			<b>Щ</b> агина Н.М.	1	43	Ямпольский И.В. (Царькова А.С., Дубинный М.А., Петушков В.Н., Родионова Н.С.)	7	10

# 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**  
**А.О.ЯКИМЕНКО**

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 20.11.2014  
Формат 60×88 1/8  
Офсетная печать  
Заказ 796  
Набрано и сверстано в редакции

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