

ПРИРОДА

9 09



В НОМЕРЕ:**3 Агол В.И.****Вирусы: корневая система
древа жизни?**

Вряд ли все знают, что вирусы нельзя считать чем-то живым. Фактически — это весьма разной формы и размеров частицы из наследственного материала (ДНК или РНК), упрятанного в белковую оболочку, не способные жить самостоятельно. Поразительное разнообразие вирусов наводит на мысль, что на они играли весьма важную роль в происхождении клеточных организмов.

12 Зефирова А.Л., Петров А.М.**Эндоцитоз в нервной системе**

Исследования молекулярных механизмов эндоцитоза и его роли в синаптической передаче могут стать важным ключом к пониманию многочисленных функций головного мозга, лежащих в основе памяти и обучения.

21 Трифонов Е.Д., Аветисян Ю.А.**На пути от оптического лазера
к атомному**

Взаимодействие когерентного оптического излучения с бозе-эйнштейновским конденсатом разреженного газа приводит к возникновению когерентных атомных волн де Бройля. Изучение этого эффекта представляет интерес для создания генератора когерентных квантовых волн материи — так называемого, атомного лазера.

29 Галоян Э.А.**Однополые ящерицы: экология
и поведение**

Способность ящериц некоторых видов размножаться без участия самцов открыта уже около полувека назад. С тех пор удалось выяснить много удивительного не только в происхождении и генетике однополых видов, но и в их образе жизни и поведении.

37 Мирлин Е.Г.**Геометрия помогает геологии****К 250-летию Государственного геологического
музея им. В.И.Вернадского РАН**

Для познания природы многих геологических структур специалистам необходимо иметь на вооружении не только геологический молоток, но и современные методы изучения нелинейных систем, в том числе анализ фрактальной геометрии различных геологических объектов.

50 Неронов В.В.**Лесной форпост в сухих степях**

Реликтовый Дьяковский лес на крайнем юге Саратовского Заволжья, расположенный ближе всего к зоне полупустыни, — уникальный природный объект для изучения биологического разнообразия.

Вести из экспедиций**59 Попов И.Ю., Ковалев Д.Н.,
Островский А.Н.****Звери подземелья****Резонанс****68 Макаров К.В.****Еще раз о Дарвине****Биография современника****74 Дровеников И.С.****Кто первым нажал советскую
«атомную кнопку»?**

По воспоминаниям Сергея Львовича Давыдова

85**Новости науки**

Стартовал к Луне и начал работать российский нейтронный детектор ЛЕНД (85). И вдруг погасли две звезды... (85). Сверхновая в галактике M82 (86). Магнитная запись с помощью электрического поля (87). Экстраординарная прочность нанотрубок подтверждена (88). Опушение из нанотрубок упрочняет композиты (88). Бумага из нанотрубок методом прокатки (88). Изучая хвосты змей... Семенов Д.В. (89). Моделирование климата раннего плейстоцена (90). Костные остатки животных из Мангазеи (91).

Рецензии**92 Зингер Е.М.****Гляциологические мотивы**

(на кн.: Супруненко Ю.П. Сверкающий мир снега и льда. Занимательная гляциология)

93**Новые книги****В конце номера****95 Медведев С.А.****Была ли нефть в архее?**

CONTENTS:

3 Agol V.I.

Viruses: A Root System of the Tree of Life?

Hardly everybody knows that viruses cannot be considered as live organisms. Actually they are particles of genetic material (DNA or RNA) of very different sizes and forms hidden inside of protein envelope and incapable to live independently. Amazing diversity of viruses suggests that they played a fairly important role in the origin of cellular organisms.

12 Zefirov A.L., Petrov A.M.

Endocytosis in Neural System

Studies of molecular mechanisms of endocytosis and its role in synaptic transmission can become an important clue to understanding of many cerebral functions underlying memory and learning.

21 Trifonov E.D., Avetisyan Yu.A.

From Optical to Atom Laser

Coupling of optical coherent radiation with Bose-Einstein condensate of dilute gas leads to creation of coherent de Broglie atomic waves. Investigation of this effect is of interest for the construction of atom quantum coherent wave generator — the so-called atom laser.

29 Galoyan E.A.

Unisexual Lizards: Ecology and Behavior

Ability of some species of lizards to reproduce without participation of males has been discovered about half a century ago. Since then a lot of interesting things were found out not only about origin and genetics of unisexual species, but also about their way of life and behavior.

37 Mirlin E.G.

Geometry Helps Geology

To 250th Anniversary of the V.I.Vernadsky State Museum of Geology RAS

To study the nature of many geological structures the specialists need to use not only geological hammer but also modern methods of analysis of non-linear systems, including analysis of fractal geometry of different geological objects.

50 Neronov V.V.

Forest Outpost in Arid Steppes

The relict Dyakovsky Forest at the extreme south of Saratovskoe Zavolzh'e situated in the nearest proximity to semi-desert zone is an unique natural object for study of biological diversity.

News From Expeditions

59 Popov I.Yu., Kovalev D.N., Ostrovsky A.N.

Underground Animals

Resonance

68 Makarov K.V.

Once Again about Darwin

Biography of Our Contemporary

74 Drovenikov I.S.

Who Was the First to Press the Soviet «Atomic Button»?

According memoirs of Sergey Lvovich Davydov

85

Science News

Russian Neutron Detector LEND Launched to Moon and Began to Function (85). And Suddenly Two Stars Went Out... (85). Supernova in the Galaxy M82 (86). Magnetic Recording Using Electric Field (87). Extraordinary Strength of Nanotubes Is Confirmed (88). Covering of Carbon Fibers by Nanotubes Strengthens Composites (88). Producing Paper from Nanotubes by Rolling (88). Studying Snake Tails... Semenov D.V. (89). Modeling Early Eocene Climate (90). Bone Remains of Animals from Mangazeya (91).

Book Review

92 Zinger E.M.

Glaciological Motives

(on a book: Suprunenko Yu.P. Sparkling World of Snow and Ice. Amusing Glaciology)

93

New Books

End of Issue

95 Medvedev S.A.

Was There Oil in Archaean?

Вирусы: корневая система древа жизни?

В.И.Агол

Для неспециалиста вирусы — просто некие мельчайшие болезнетворные агенты, от которых нужно по возможности избавляться всеми доступными средствами. Конечно, «зловредность» некоторых вирусов сомнению не подлежит. Однако значение этих «агентов» далеко выходит за медицинские рамки, и многие исследователи полагают, что вирусы замечательно «потрудились» над созданием всего живого на Земле. Краткому рассмотрению этих взглядов и посвящен настоящий очерк*.

Паразитическое разнообразие

Вирусы — это генетические элементы, существующие в двух формах. Первая, пассивная, внеклеточная, форма представляет собой молекулы ДНК или РНК, обычно заключенные в белковую оболочку, иногда содержащую еще липиды и углеводные компоненты. Можно сказать, что вирусы — просто некий класс весьма сложных химических соединений. Например, один из вариантов вируса полиомиелита может быть представлен такой формулой: $C_{332652}H_{492388}N_{98245}O_{131196}P_{7501}S_{2340}$ [3]. Другая форма существования вирусов — активная, внутриклеточная,



Вадим Израилевич Агол, член-корреспондент РАН и РАМН, доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института полиомиелита и вирусных энцефалитов им.М.П.Чумакова РАМН, профессор кафедры вирусологии и заведующий отделом Института физико-химической биологии им.А.Н.Белозерского МГУ. Область научных интересов — молекулярная биология и генетика вирусов. Автор трех монографий (в соавторстве).

точная, и обычно способная к выражению генетической информации. В такой форме они — живые объекты, обладающие наследственностью и эволюционирующие.

Вирусы составляют наиболее многочисленный класс биологических объектов. По некоторым оценкам, на нашей планете существует порядка 10^{31} вирусных частиц [4]. Полагают, что в вирусах, обитающих только в океанах и морях, содержится $\sim 2 \cdot 10^8$ т углерода, что примерно эквивалентно содержанию этого элемента в 70 млн голубых китов. Если эти вирусы выстроить в цепочку, ее длина составит $\sim 10^7$ св. лет (~ 100 диаметров нашей Галактики) [5, 6].

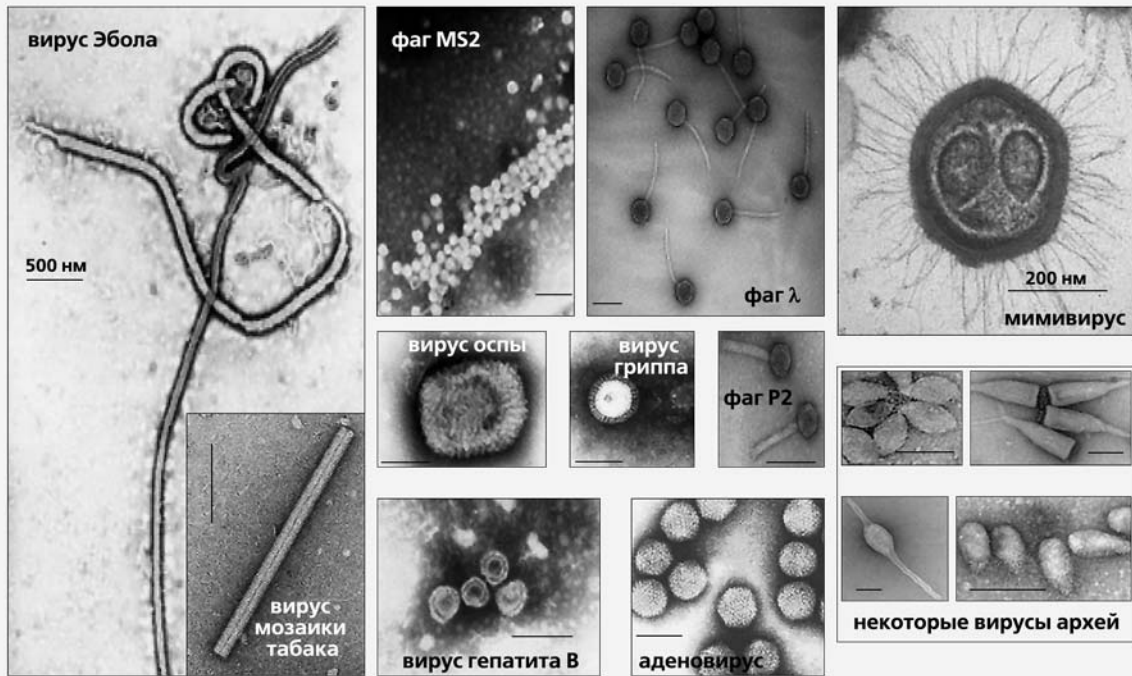
Вирусы не только многочисленны, но и чрезвычайно разнообразны. В килограмме морского осадка может находиться до

миллиона различных вариантов вирусов [4]. Они бывают палочковидной или нитевидной формы, кубической или спиральной симметрии, могут представлять собой сложные структурные образования и т.д. Самый крупный из известных вирусов — мимивирус — вполне сопоставим по размерам с мельчайшими микроорганизмами, такими, например, как микоплазма.

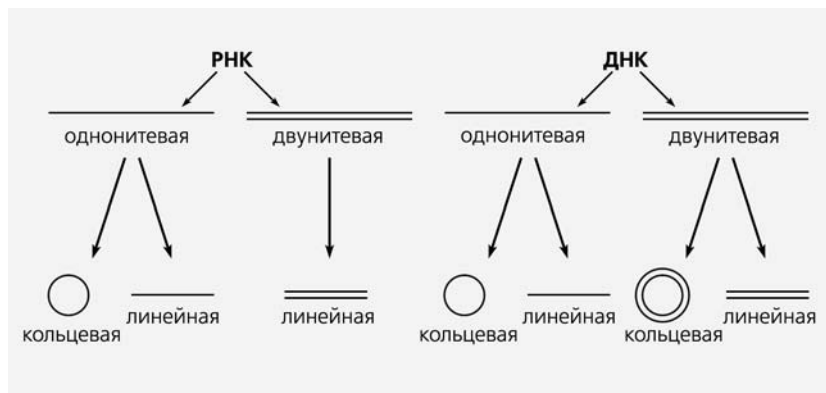
Наследственная информация вирусов (геном) может храниться как в однополовых, так и в двуполовых молекулах РНК или ДНК, линейных или кольцевых. (Как известно, клеточные организмы имеют только двуполовые — линейные или кольцевые — ДНК-геномы.) Количество нуклеотидов в геномах известных РНК-вирусов варьирует от немногим более 1.5 тыс. до ~ 32 тыс., а число генов — от од-

© Агол В.И., 2009

* Статья основана на лекциях, прочитанных на школе «Evolution from Molecular to Social Scales» (Гейло, Норвегия, 16 апреля 2007 г.) [1] и на совещании «Проблемы происхождения жизни» (Палеонтологический институт им.А.А.Борисяка, Москва, 22 сентября 2008 г.) [2].



Разнообразие форм и размеров вирусов. Масштаб (если не указан особо) — 100 нм. (Использованы изображения с сайтов www.ncbi.nlm.nih.gov/ICTV/db/images и www.giantvirus.org/gallery/html, а также из работы [19].)



Схематическое изображение структуры и формы вирусных геномов.

Таблица

Размеры ДНК-геномов самого крупного из известных вирусов (мимивируса) и самых мелких клеточных организмов

	Число пар нуклеотидов	Количество генов
Мимивирус	$\sim 1.2 \cdot 10^6$	~ 1200
<i>Buchnera aphidicola</i>	$\sim 4.2 \cdot 10^5$	~ 400
<i>Guillardia theta nucleomorph</i>	$\sim 5.5 \cdot 10^5$	~ 450
<i>Nanoarchaeon equitans</i>	$\sim 4.9 \cdot 10^5$	~ 580

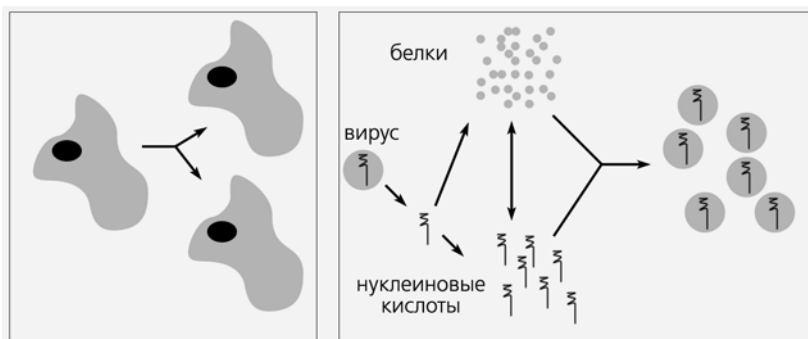
ного до полутора десятков. В вирусных ДНК-геномах вариации более значительны: если минимальное содержание нуклеотидов в них несильно отличается от такового у РНК-вирусов, то известный сегодня максимум составляет $\sim 1.2 \cdot 10^6$ пар нуклеотидов, а количество генов колеблется от 2 до ~ 1200 . Размер ДНК и число генов у самых крупных вирусов в несколько раз превышает эти параметры у мельчайших эубактерий (например, *Buchnera aphidicola*), архебактерий (*Nanoarchaeon equitans*) и эукариот (*Guillardia theta*) (таблица).

Если вирусы столь разнообразны, то что же их объединяет и отличает от всех других (клеточных) организмов? Таких фундаментальных признаков два — особенности обмена веществ и способ размножения. Обмен веществ у вирусов чрезвычайно скуден: им не свойст-

вен ни один из процессов (дыхание, гликолиз или фотосинтез), который обеспечивал бы их энергией, накапливаемой в виде универсального биологического хранителя — аденозинтрифосфата (АТФ) и подобных ему соединений. Кроме того, вирусы не способны синтезировать белок, так как у них нет трансляционного аппарата — рибосом, необходимых ферментов и разных белковых факторов. (А ведь даже мельчайшие паразитические микроорганизмы умеют синтезировать белки и производить АТФ.) Эти особенности обмена веществ ведут к полной зависимости вирусов от клетки-хозяина, к способности размножаться только в ней, используя клеточные механизмы синтеза белков и генерации энергии.

Такая «жизненная» стратегия, называемая облигатным паразитизмом, входила во многие определения вирусов. Сейчас появились некоторые уточнения. Так, выявлена принципиальная возможность размножения вирусов в бесклеточных системах (экстрактах, приготовленных путем разрушения клеток) [7]. Тем не менее абсолютная зависимость вирусов от клеточных компонентов и источников энергии остается непреложным фактом. Показано также, что в лаборатории химическим синтезом можно получить жизнеспособный вирусный геном [8], но размножаться он может опять-таки только либо в живых клетках, либо в бесклеточных экстрактах. Таким образом, фундаментальное различие метаболизма вирусов и клеточных организмов сохраняет силу.

Второй отличительный признак — сам способ размножения. Он основан на так называемом дизъюнктивном механизме (англ. disjunction — разделение, разъединение): вирус-специфические белки и нуклеиновые кислоты накапливаются в виде отдельных пулов (англ. pool — общий фонд, объединенный резерв), из которых в конечном счете они черпаются для сборки



Различия между механизмами деления клеток и размножения вирусов. Клетка размножается делением (здесь показано бинарное), а вирусы — за счет дизъюнктивного механизма: компоненты вируса — нуклеиновая кислота и белки — синтезируются зараженной им клеткой (нередко в разных ее структурных частях), затем эти компоненты соединяются и образуются новые вирусные частицы.

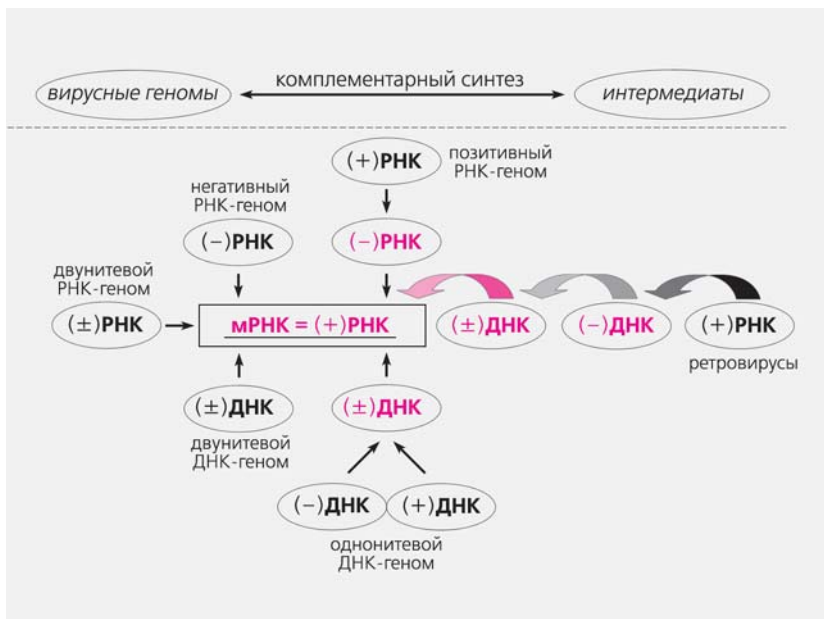
дочерних вирусных частиц или их главного компонента — нуклеопротеидной (нуклеин-белковой) сердцевинки. В противоположность этому, клетки размножаются делением (чаще всего, но не обязательно — бинарным). На каких-то этапах своей жизненной истории геном некоторых вирусов может включаться в состав клеточной хромосомы. В этом случае вирусный геном существует как ее интегральный компонент и подвергается удвоению при клеточном делении. Однако последующее образование вирусного потомства (т.е. собственно репродукция вируса) всегда происходит по каноническому дизъюнктивному механизму.

Хранение и передача генетической информации

Уже на сравнительно ранней стадии изучения молекулярной биологии вирусов стало ясно, что эти объекты используют разнообразные способы хранения и выражения генетической информации, которые нельзя было предвидеть. Как уже упоминалось, вирусные геномы, в отличие от клеточных, могут быть представлены различными формами нуклеиновых кислот. Удобную — и сейчас общепри-

нятую — классификацию вирусов, в которой принимается во внимание это фундаментальное разнообразие, предложил Д.Балтимор в 1971 г. [9]. Вирусы были разбиты на группы в зависимости от механизма образования вирусной информационной, или матричной, РНК (мРНК), направляющей синтез вирусных белков. Этой мРНК условно приписана положительная (+) полярность. Позитивными стали называть и те цепи геномных нуклеиновых кислот (РНК и ДНК), у которых полярность соответствует полярности мРНК. Цепочки же РНК или ДНК, комплементарные вирусной мРНК, имеют негативную (–) полярность. В итоге вирусы были разбиты на шесть групп, или классов:

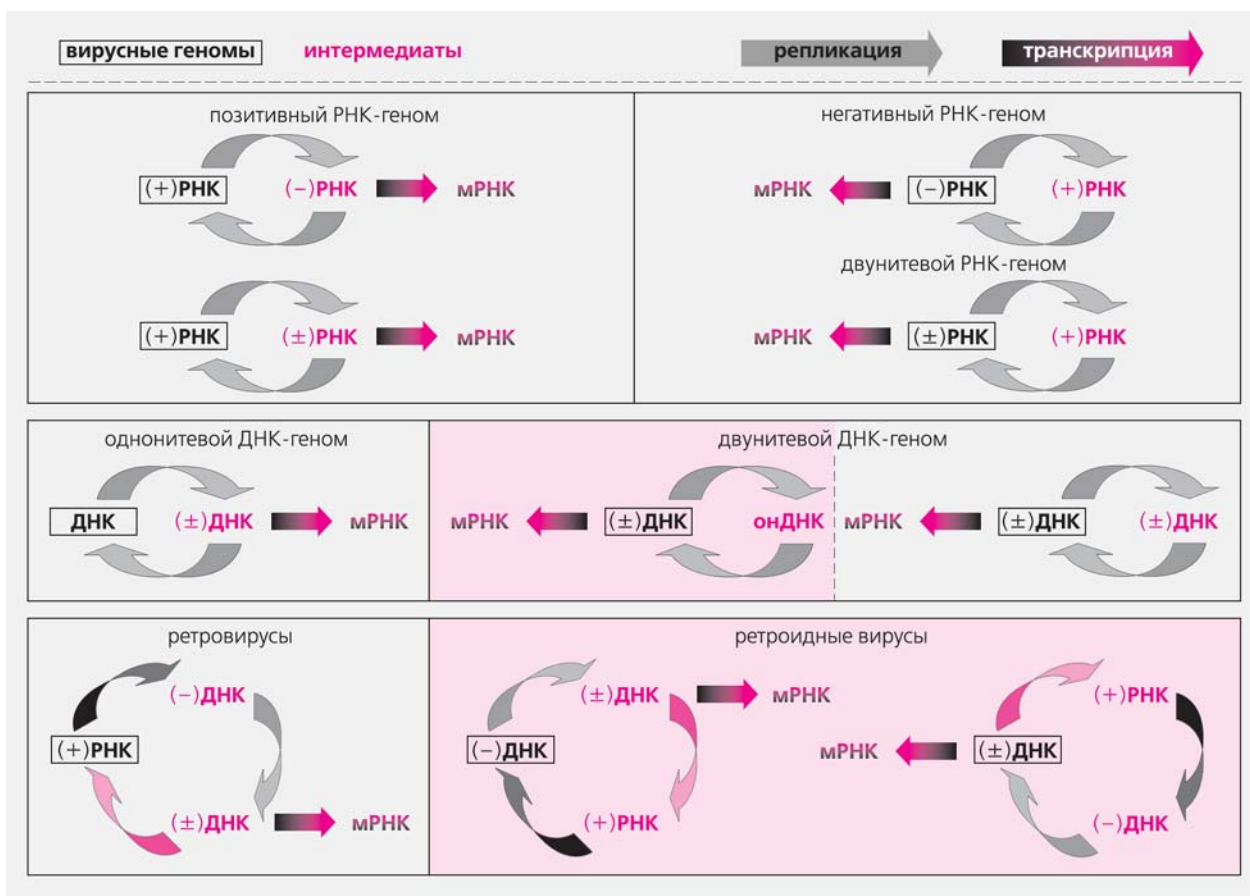
- с позитивным РНК-геномом (например, вирусы полиомиелита, клещевого энцефалита, гепатита А);
- с негативным РНК-геномом (вирусы гриппа, кори, бешенства);
- с двунитевым РНК-геномом (ротавирусы);
- с двунитевым ДНК-геномом (вирусы герпеса, оспы, аденовирусы);
- с одонитевым ДНК-геномом (парвовирусы, полярность цепей не имеет принципиального значения);



Классификация вирусов, предложенная Д.Балтимором ([9], с изменениями).

— ретровирусы, использующие механизм обратной транскрипции, т.е. синтез ДНК на матрице РНК (некоторые онковирусы, ВИЧ).

Вскоре после публикации классификации Балтимора мы задумались над тем, исчерпывают ли включенные в нее вирусы все возможные способы хранения и выражения генетической информации. На основе достаточно простых молекулярно-биологических постулатов — прежде всего, на принципе комплементарности при синтезе нуклеиновых кислот — мы предложили теоретическую систему вирусов, в которой предусматривалась возможность существования и некоторых тогда неизвестных классов этих объектов [10, 11]. Наиболее важными



Система вирусов. У разных РНК-вирусов участвовать в репликации (серые стрелки; розовым шрифтом показаны промежуточные продукты) и транскрипции могут либо одни те же молекулы (+)РНК, либо несколько различающиеся формы. Обратная транскрипция геномов ретро- и ретроидных вирусов обозначены черно-серыми стрелками. Геномы, изображенные на розовом фоне, были предсказаны, а впоследствии обнаружены ([10], с изменениями).

«новичками» были вирусы с ДНК-геномом, цикл репродукции которых включал бы обратную транскрипцию. Такие предсказанные вирусы действительно вскоре обнаружили, сейчас их называют ретроидными, или параретровирусами. К ним относится такой важный патоген, как вирус гепатита В, а также ряд растительных вирусов, например вирус мозаики цветной капусты. Вирусы с позитивным РНК-геномом и двунитевым ДНК-геномом были формально разбиты на два класса каждый — в зависимости от того, из одной нити или из двух состоят промежуточные (образующиеся при репликации) формы геномной нуклеиновой кислоты. Все эти классы сейчас «заселены».

Строго говоря, существует еще одна форма вирусных РНК-геномов — она содержит обоюдозначающую (ambisense) однонитевую РНК. Один участок такой молекулы выполняет функции (+)РНК и непосредственно кодирует белки, а другой сегмент той же молекулы соответствует по полярности (–)РНК и должен сначала послужить матрицей для синтеза комплементарной информационной (+)РНК. Вирусы с таким геномом по своей организации, а также по ряду механизмов репликации и выражения генетической информации имеют много общего с вирусами, обладающими одонитевым негативным РНК-геномом.

Можно добавить, что у многих вирусов с двунитевым ДНК-геномом каждая из нитей также может быть обоюдозначающей, т.е. иметь участки с позитивной и негативной полярностью. Однако такие вирусы не выделяют из этой группы потому, что фундаментальная стратегия размножения у всех у них принципиально одна и та же.

Таким образом, у вирусов, в отличие от клеточных организмов, реализуются все теоретически возможные способы хранения и выражения генетической информации. Это важ-

нейшее обстоятельство, несомненно, имеет прямое отношение к проблеме происхождения вирусов.

«Родственники»

У вирусов есть многочисленные и довольно близкие родственники — «эгоистические» генетические элементы (как ДНК, так и РНК). Подобно вирусам, они полностью зависят от клеточных механизмов синтеза белков и генерации энергии. К родственникам относят:

- вириды (инфекционные, но не способные кодировать белки, относительно низкомолекулярные кольцевые РНК);

- плазмиды (разнообразные нехромосомные ДНК- и РНК-элементы);

- транспозоны (мобильные генетические элементы, которые перемещаются между различными участками генома);

- ретротранспозоны (мобильные элементы ДНК, меняющие место по механизму обратной транскрипции);

- интроны (участки РНК, которые выщепляются из вновь синтезированных молекул при их «созревании» в процессе так называемого сплайсинга, а также соответствующие им участки ДНК).

Эти элементы могут включаться в клеточные ДНК или РНК или существовать в виде самостоятельных (до известной степени) молекул. Некоторые из них способны размножаться в клетке и мигрировать между клетками. И хотя, в отличие от вирусов, у этих элементов нет белковых оболочек и стабильных внеклеточных форм, с вирусами их объединяет фундаментальная черта — они используют те же механизмы репликации и выражения генетической информации. Поэтому ряд исследователей (хотя и не все) объединяют «эгоистические» элементы с вирусами в один общий домен биологических объектов. Это положе-

ние, которое мы разделяем, также весьма значимо, когда рассматривается происхождение вирусов.

Проблема происхождения

Эволюционные взаимоотношения между вирусами и клеточными организмами — один из ключевых вопросов проблемы происхождения жизни. Нередко эволюцию трех главных живых доменов, или «царств», — архебактерий, эубактерий и эукариот — изображают в виде единого дерева (хотя полного согласия в этом нет). Каково место вирусов на этом древе? И есть ли вообще такое место? Более того, правомерно ли представлять эволюцию вирусов в виде единой ветви какого-то дерева или даже просто отдельного дерева?

Проблема происхождения вирусов, естественно, привлекала к себе внимание со времени их открытия Д.И.Ивановским в конце XIX в. Обсуждение этого интригующего вопроса в течение примерно 100 лет вынужденно носило чисто спекулятивный характер. Тем не менее было высказано несколько интересных и в то время привлекательных гипотез. Схематически их можно разбить на три группы. В первой вирусы представлялись «сбежавшими» из клетки «сумасшедшими» генами. Во второй — клетками, которые дегенерировали до предела паразитизма. В третьей группе гипотез вирусы считались доклеточными генетическими элементами.

В то время последняя точка зрения была наименее популярна, но, как увидим, оказалась наиболее близкой теперешним представлениям.

Самые распространенные современные гипотезы происхождения вирусов основаны на двух крупных достижениях молекулярной биологии. Первое из них — открытие рибозимов (молекул РНК, обладающих ферментативной активностью) и формулирование теории «мира

РНК», постулирующей, что РНК была «изобретена» раньше ДНК и белков. Второе достижение — успехи геномики (расшифровка и анализ нуклеотидных последовательностей огромного числа клеточных и вирусных геномов).

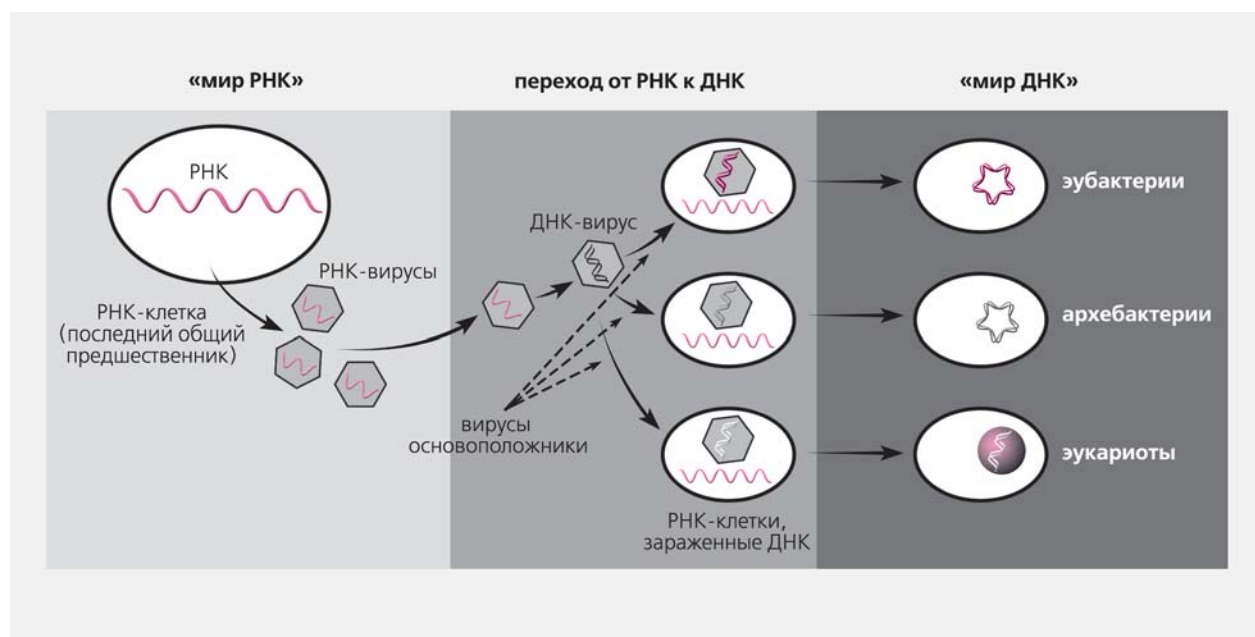
Конечно, есть особая фундаментальная проблема происхождения «мира РНК». Она отнюдь не решена, и приходится пока довольствоваться достаточно спекулятивными гипотезами, которые здесь анализировать не будем. Примем, что строительные «кирпичики» РНК (рибонуклеотиды) и их короткие цепочки (олигорибонуклеотиды) возникли абиогенным путем из более простых химических соединений. Они могли объединяться между собой (лигироваться) в разных комбинациях до тех пор, пока не возникли рибозимы, способные как синтезировать молекулы РНК, так и осуществлять их размножение (репликацию) путем комплементарного синтеза [12]. А далее вступал в действие дарвиновский отбор молекул, наиболее приспособленных к размножению в существовавших тогда условиях.

Современные взгляды на происхождение

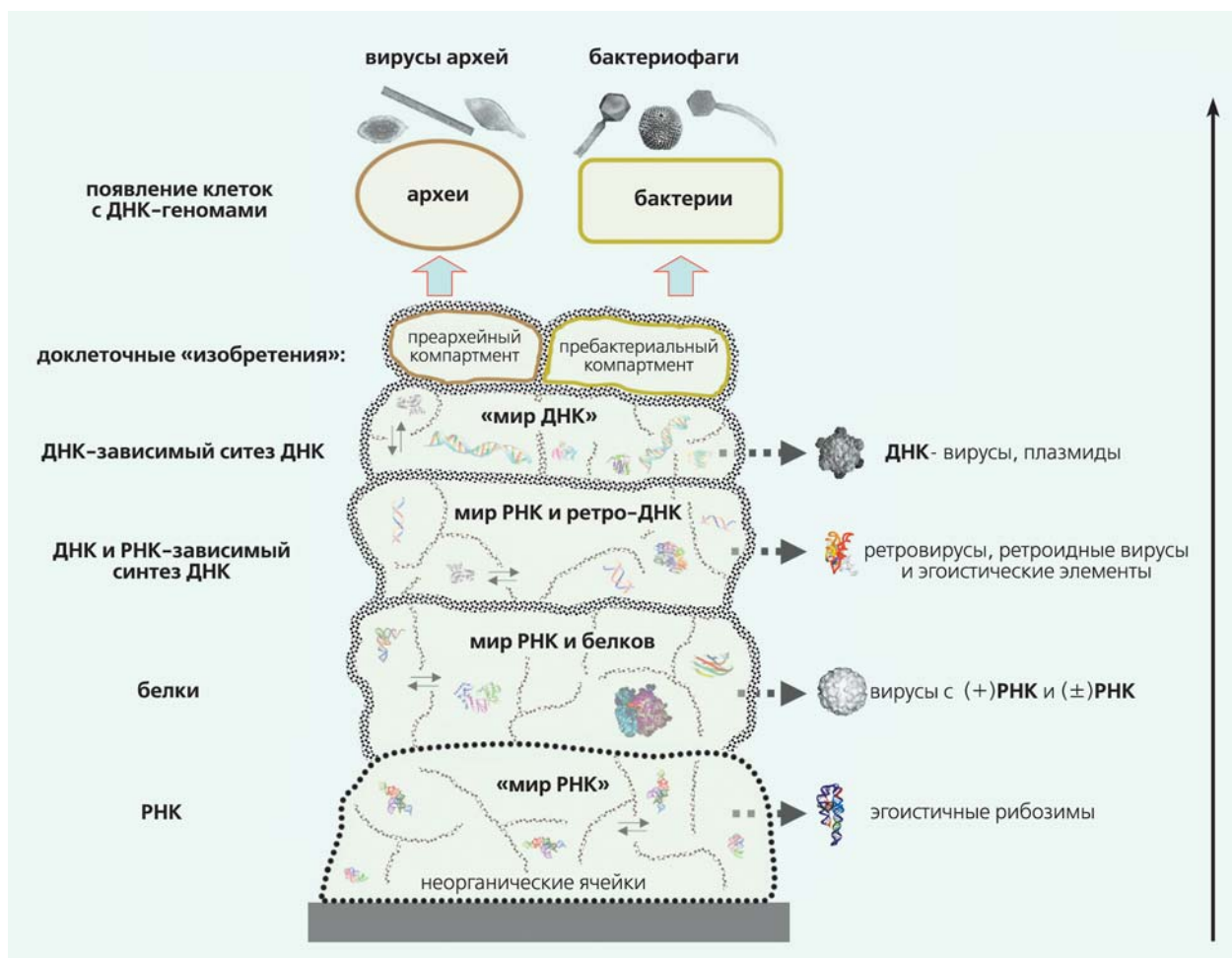
Происхождение вирусов по-прежнему остается областью гипотез и в значительной мере личных взглядов. Тем не менее эти взгляды, хотя они и не основаны на точном знании, представляют, как кажется, значительный интерес. В качестве примера кратко рассмотрим две в чем-то перекрывающиеся, но все же существенно различающиеся гипотезы происхождения вирусов и их роли в эволюции клеточных организмов. Одна из гипотез принадлежит П.Фортеру [13, 14]. Французский исследователь постулирует, что последний общий предшественник всего живого (the Last Universal Common Ancestor — LUCA) представлял собой клетку с РНК-геномом, в которой «жили» РНК-содержащие вирусы. Важно, что для репликации клеточного и вирусного геномов в этом случае требовался один и тот же класс ферментов — РНК-зависимые РНК-полимеразы. Предполагается, что современные РНК-вирусы унаследо-

вали этот ключевой фермент с тех древнейших времен. Действительно, такие полимеразы у большинства известных вирусов с позитивным однонитевым или двунитевым РНК-геномом проявляют столь существенное сходство, что можно говорить об их общем происхождении. Для возникновения РНК-вирусов потребовалось «изобрести» капсид, т.е. белковую оболочку. Опять-таки, белки оболочки многих вирусов с однонитевым и двунитевым РНК-геномом обладают принципиально сходной структурной организацией, несмотря на то что аминокислотные последовательности этих белков могут иметь между собой мало общего. Отсюда выводится предположение, что у капсидных белков был общий прародитель.

Следующим фундаментальным эволюционным событием, по гипотезе Фортера, было возникновение ДНК. Предполагается, что первые молекулы ДНК образовались в результате синтеза на матрице РНК, т.е. благодаря обратной транскрипции, и появились они у вирусов, ко-



Модель перехода от «мира РНК» к «миру ДНК» по Фортеру. По его гипотезе, в эпоху «мира РНК» уже имела клетка, но ее геном состоял из молекул РНК. Дальнейшие преобразования происходили путем заражения РНК-клеток разными ДНК-вирусами, и, наконец, образовались три домена с ДНК-геномами — эубактерии, архебактерии и эукариоты.



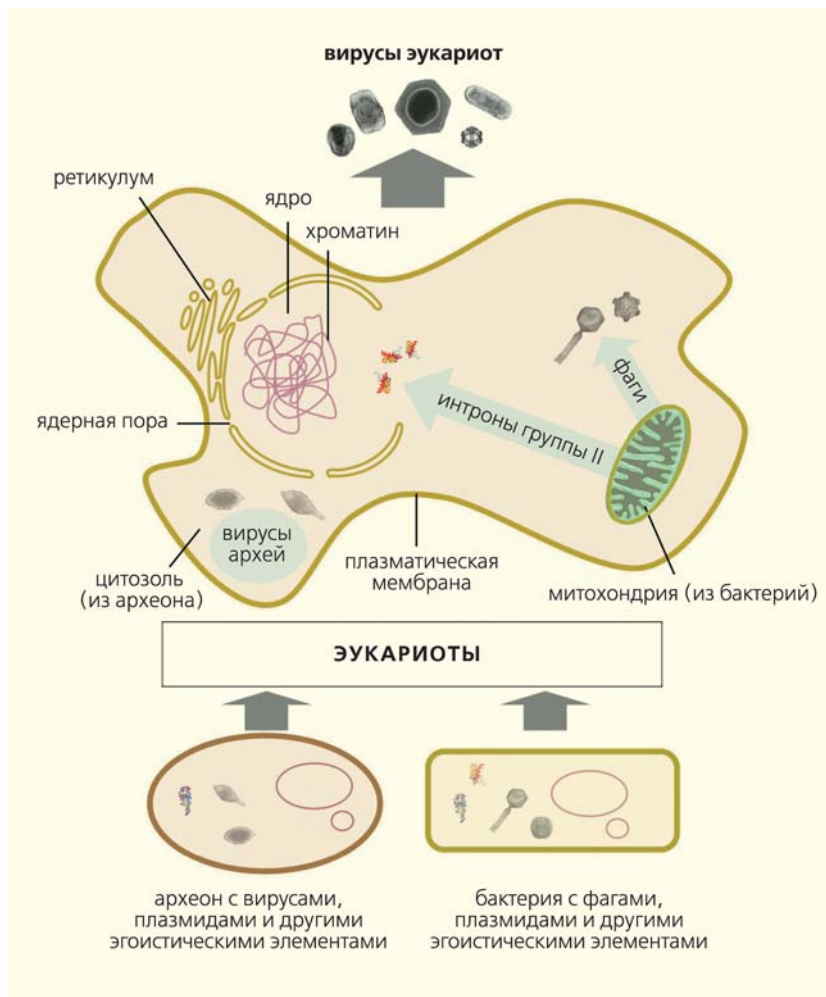
Модель Кунина и соавторов, изображающая переход от доклеточного «мира РНК» к археобактериям (археям) и зубактериям (бактериям). По этой модели сначала в неорганических ячеистых структурах — неких суррогатах клеток — возникли рибозимы — молекулы РНК, обладающие ферментативной активностью. Работа рибозимов привела к образованию белков, и появились РНК-вирусы. Затем был «изобретен» синтез ДНК на матрице РНК и появились ретровирусы, ретроидные вирусы и эгоистические элементы. Наконец, возник ДНК-зависимый синтез ДНК, зародились ДНК-вирусы и плазмиды. Все это происходило еще на доклеточной стадии эволюции. Потом началась клеточная жизнь — появились археи и бактерии, которые могли заражаться вирусами и бактериофагами.

которые по современной терминологии называют ретровирусами. Их возникновение сопряжено по крайней мере с двумя принципиальными новшествами. Первое «изобретение» — это ферменты, умеющие осуществлять обратную транскрипцию, т.е. РНК-зависимые ДНК-полимеразы (обратные транскриптазы, или, как их называл академик В.А.Энгельгардт, ревертазы). Появление таких ферментов сильно облегчала уже имевшаяся «подсказка» — существовавшие тогда РНК-зависимые РНК-полимеразы. По их образу

и подобию и устроены в значительной степени обратные транскриптазы. Действительно, между этими двумя классами ферментов имеется заметное структурное сходство. Второе новшество — это возникновение ферментов, способных превращать субстраты для синтеза РНК (рибонуклеозиды или рибонуклеотиды) в субстраты для синтеза ДНК (дезоксирибонуклеозиды или дезоксирибонуклеотиды). Так или иначе, и эта задача была решена. Следует заметить, что «изобретать» для ретровирусов принципиально но-

вый класс белков оболочки не понадобилось — был использован (и до сих пор используется) общий план строения капсидных белков РНК-вирусов.

И, наконец, наступил закат «мира РНК» и началась «эпоха ДНК». С биохимической точки зрения ключевым этапом здесь было появление нового класса ферментов — ДНК-зависимых ДНК-полимераз. Это, в свою очередь, обеспечило возможность возникновения ДНК-вирусов. Превращение клеток с РНК-геномом в клетки с привычным ДНК-геномом произо-



Модель появления эукариотической клетки, а также вирусов эукариот в результате поглощения бактерии архейной клеткой ([16], с изменениями).

шло, по Фортеру, в результате их заражения ДНК-вирусами. Постулируется, что три домена клеточных организмов возникли независимо — заразившись разными ДНК-вирусами-основателями (founder viruses). Такие основоположники дали начало эубактериям, архебактериям (археям) и плазмидам, в то время как для появления эукариот потребовалось несколько разных «отцов-основателей».

По гипотезе, которую развивает Е.В.Кунин с коллегами [15, 16], жизнь зародилась в микроскопических неорганических ячеистых структурах, которые могли служить суррогатами клеток. Рибозимы, возникшие на

добиологической стадии эволюции, накапливались в таких ячейках в относительно высоких концентрациях, передвигались между ячейками и «заражали» их. Следующий фундаментальный этап — возникновение РНК-вирусов с одонитевым и двунитевым геномами. Затем, как и у Фортера, следует появление обратной транскрипции и ретровирусов и, наконец, возникновение ДНК-зависимого синтеза ДНК и ДНК-вирусов. Но все это происходило, по Кунину, еще на доклеточной стадии эволюции. А клетки с ограничивающими их мембранами образовались уже после того, как возникли основные способы хранения и передачи генетичес-

кой информации. И сначала появились археи и эубактерии. Эукариоты же зародились, в соответствии с широко распространенной точкой зрения, в результате поглощения бактериальной клетки архейной клеткой. При этом эукариотические потомки унаследовали генетические структуры не только от этих двух клеточных прародителей, но и от их вирусов, а вирусы эукариот — от бактериальных фагов и вирусов архей. Этот вывод подкрепляется сравнительным анализом аминокислотных последовательностей и белковых структур таких ключевых ферментов, как РНК-зависимая РНК-полимераза, обратные транскриптазы, некоторые ферменты синтеза ДНК, а также капсидных белков.

Таким образом, по этой гипотезе, клетки произошли позже вирусов и на их основе. Что же касается самих вирусов, то их разные группы могут не иметь общего предшественника (т.е. немонафилетичны, выражаясь научным языком), но в каком-то смысле все они — родственники.

Общее для этих двух гипотез эволюционной истории — представление о том, что современные вирусы унаследовали от древнейшего мира многие молекулярные механизмы, которые не сохранились у клеточных организмов. Именно поэтому способы транскрипции и репликации у вирусов значительно разнообразнее, чем у клеточных организмов.

Однако возникновение клеток не означало прекращения обмена генетической информацией между миром вирусов и миром клеточных организмов. Такой обмен, по-видимому, продолжался и продолжается на протяжении всей истории биосферы. В частности, можно полагать, что некоторые вирусы приобрели у клеток вспомогательные ферменты синтеза РНК и ДНК, а также, что очень важно, протеазы. Пример относительно более свежих вирусных за-

имствований у клеток — белки, взаимодействующие с компонентами врожденного и приобретенного иммунитета, особенно характерные для крупных вирусов.

Не останавливался и поток генов от вирусов к клеткам. Здесь следует упомянуть об эндогенных вирусах — остатках генов ретровирусов, внедрившихся в клеточные хромосомы. По некоторым оценкам, более половины генома млекопитающих — вирусного происхождения, если учитывать как самые древнейшие, так и более новые приобретения.

* * *

Краткое рассмотрение современных взглядов на происхождение клеточных организмов показывает, сколь важная,

а возможно, и решающая роль придается в этом процессе вирусам. Как выразился один вирусолог, «древо жизни своими корнями погружено в океан вирусов» [17]. Многие (хотя и не все) исследователи полагают, что ДНК-содержащие вирусы произошли от РНК-содержащих. Эти эволюционные варианты весьма интересны, они объясняют сравнительное богатство способов хранения и реализации генетической информации у вирусов, а также стимулируют дальнейшие исследования.

Конечно, нельзя забывать, что мир вирусов — один из главных источников болезней человека, животных и растений. В этой ипостаси вирусы — то, с чем надо бороться самым активнейшим образом. Нельзя

сбрасывать со счетов и еще одно: вирусы, вызывая массовую гибель организмов в Мировом океане, оказывают существенное влияние на планетарные геохимические процессы. Но особенно важно то, что человечество, да и вся живая природа не были бы без вирусов таковыми, какие они есть, а может быть, и не существовали бы вообще.

В заключение можно согласиться с замечанием Ф.Дулитла: «Пока эволюционные сценарии — все же ближе к произведению искусства и поэтому не обязательно должны быть истинными» («Evolutionary scenarios are not an artform. They do not have to be true!» [18]). Будем надеяться, что прогресс науки либо подтвердит их справедливость, либо выдвинет новые, еще более увлекательные сценарии. ■

Литература

1. Agol V.I. The Origin and Evolution of Viruses // Evolution from Cellular to Social Scales / Eds A.T.Skjeltorp, A.V.Belushkin. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Geilo, 2008. P.91—98.
2. Агол В.И. Вирус — до или после клетки? // Проблемы происхождения жизни. М., 2009 (в печати).
3. Wimmer E., Hellen C.U., Cao X. // Annu. Rev. Genet. 1993. V.27. P.353—436.
4. Breitbart M., Robwer F. // Trends Microbiol. 2005. V.13. P.278—284.
5. Suttle C.A. // Nature. 2005. V.437. P.356—361.
6. Suttle C.A. // Nature Rev. Microbiol. 2007. V.5. P.801—812.
7. Molla A., Paul A.V., Wimmer E. // Science. 1991. V.254. P.1647—1651.
8. Cello J., Paul A.V., Wimmer E. // Science. 2002. V.297. P.1016—1018.
9. Baltimore D. // Bacteriol. Rev. 1971. V.35. P.235—241.
10. Агол В.И. // Усп. соврем. биол. 1974. Т.77. P.9—29.
11. Agol V.I. // Biosystems. 1974. V.6. P.113—132.
12. Briones C., Stich M., Manrubia S.C. // RNA. 2009. V.15. P.743—749.
13. Forterre P. // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2006. V.103. P.3669—3674.
14. Forterre P. // Virus Res. 2006. V.117. P.5—16.
15. Koonin E.V., Martin W. // Trends Genet. 2005. V.21. P.647—654.
16. Koonin E.V., Senkevich T.G., Dolja V.V. // Biology Direct. 2006. V.1. P.29.
17. Bamford D.H. // Res. Microbiol. 2003. V.154. P.231—236.
18. Doolittle W.F. Reviewer's Report 1 // Koonin et al. Biology Direct. 2006. V.1. P.29.
19. Prangishvili D., Forterre P., Garrett R.A. // Nature Rev. Microbiol. 2006. V.4. P.837—848.

Эндоцитоз в нервной системе

А.Л.Зефирова, А.М.Петрова

Плазматическая мембрана, отделяющая внутриклеточную среду от внеклеточной, — очень динамичная структура. Она регулирует вход и выход малых и больших молекул. Аминокислоты, сахара и ионы проходят через плазматическую мембрану с помощью встроенных в нее белковых насосов, переносчиков и каналов, а макромолекулы и крупные частицы — благодаря эндоцитозу. Этот процесс заключается в том, что участок поверхностной мембраны, к которому с внешней стороны могут присоединиться различные субстанции, погружается в глубину клетки (интернализуются), а затем отщепляется, формируя мембранный пузырек (везикулу), содержащий «кусочек» окружающей среды (рис.1). Эндоцитоз в зависимости от механизма принято делить на две обширные категории — *фагоцитоз* (захват очень крупных частиц) и *пиноцитоз* (захват жидкостей, а также растворенных в них молекул). У млекопитающих фагоцитоз осуществляется макрофагами, моноцитами, нейтрофилами и некоторыми глиальными клетками, которые задействованы в очищении организма от патогенов больших размеров и крупных частиц. Поглощение бактерий, грибов обычно сопровождается воспалительной реакцией со стороны макрофага с образованием токсичных свободных радикалов кислоро-



Андрей Львович Зефирова, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой нормальной физиологии Казанского государственного медицинского университета. Область научных интересов — физиология центральной и периферической нервной систем и мышц, в частности молекулярные механизмы, лежащие в основе синаптической передачи.



Алексей Михайлович Петрова, кандидат биологических наук, ассистент той же кафедры. Занимается изучением экзо- и эндоцитоза синаптических везикул с использованием электрофизиологических, биохимических и флуоресцентных методов, а также вопросами регуляции везикулярного цикла.

да, тогда как при очистке организма от собственных погибших клеток, например в участках повреждения тканей или в течение развития, макрофаг ведет себя весьма «тактично» и не выделяет агрессивных, вызывающих воспаление, веществ. Некоторые клетки иммунной системы используют макропиноцитозную активность для отбора и «проверки» на наличие антигенов больших объемов внеклеточной среды. С помощью пиноцитоза, который имеет множество вариантов, клетки

контролируют состав (количество поверхностных рецепторов, ионных каналов, в том числе водных каналов, аквапоринов, переносчиков, насосов) и площадь мембраны.

Эндоцитоз играет ключевую роль в развитии организма, иммунном ответе, жировом обмене, сохранении размеров клетки, передаче сигналов внутрь клетки и поддержании гомеостаза целого организма [1, 2]. Особое место эндоцитоза занимает в нервной системе, поскольку передача информации

между нейронами, протекающая в специализированных структурах (синапсах), напрямую сопряжена с интенсивным использованием этого механизма [3, 4]. В настоящее время многие ведущие лаборатории мира пытаются разобраться в сложных молекулярных взаимодействиях, управляющих эндоцитозом. Этот в высокой степени координированный и сопряженный со всей физиологией клетки процесс позволяет предположить, что для его появления было потрачено огромное эволюционное усилие.

В пределах нервной системы фагоцитозом обладают только некоторые глиальные клетки (микроглия), которые задействованы в очищении мозга от остатков мертвых клеток, отложенных жира и белков. В этом случае сначала клеточные поверхностные рецепторы связываются с определенными участками на поглощаемой частице. Затем начинается сборка специального белка актина. Его молекулы, взаимодействуя друг с другом, образуют длинные нити, способствующие формированию выступов (выростов) на плазматической мембране. Окруженная ими частица оказывается внутри клетки в составе больших вакуолей, фагосом (рис.1), которые перевариваются пищеварительными ферментами.

Во многих клетках, в том числе и в нейронах, крупные частицы, а также большие объемы жидкости могут поглощаться макропиноцитозом (рис.1). В этом случае благодаря актину на мембране образуется складка, окутывающая поглощаемую частицу, и затем формируется большая эндоцитозная везикула, макропинососома. В большинстве клеток макропиноцитоз используется для уменьшения площади плазматической мембраны и количества поверхностных рецепторов.

Пиноцитоз впервые появился при эволюционном переходе от про- к эукариотам. Чтобы выжить, ранние клетки научились

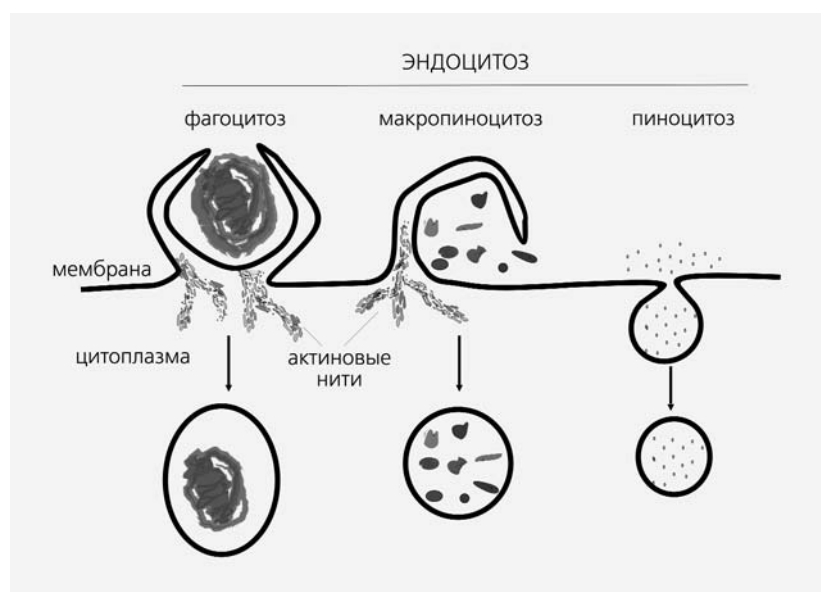


Рис.1. Разновидности эндоцитоза. Поверхностные рецепторы плазматической мембраны связываются с определенными участками на поглощаемой частице. Это приводит к образованию белка актина. Его длинные нити способны толкать податливую мембрану, что приводит либо к формированию выступов (фагоцитозу), либо к образованию складки (макропиноцитозу). Пиноцитоз, который используют многие клетки, состоит в захвате небольших по массе веществ вместе с жидкостью.

захватывать внеклеточную жидкость вместе с растворенными макромолекулами (пиноцитоз) и вливать пищеварительные ферменты непосредственно в эндоцитозную вакуоль. В ходе эволюции пиноцитоз кроме питательной стал выполнять иные функции, например участвовать в нервной системе для коммуникации клеток [1].

Экзоцитоз, эндоцитоз и пресинаптический везикулярный цикл. Напомним, как нервные клетки «общаются» между собой. Передача информации (бит информации — нервный импульс — потенциал действия) между нейроном и секреторной или мышечной клеткой происходит в синапсе, где мембраны взаимодействующих клеток почти вплотную подходят друг к другу (рис.2). Участок нервной клетки, передающий сигнал (пресинаптический), и участок другой клетки, принимающий сигнал (постсинаптический), разделены узкой синаптической щелью. Пресинаптические нерв-

ные окончания содержат большое количество везикул, наполненных химическим посредником (нейромедиатором). В ответ на нервный импульс везикулы сливаются с пресинаптической мембраной (экзоцитоз), выделяя нейромедиатор в синаптическую щель. Достигнув рецепторов на постсинаптической мембране, нейромедиатор активирует их, в результате чего возникает электрический сигнал. Его величина определяет возбуждение в постсинаптической клетке. Чем больше нейромедиатора освободят везикулы, тем сильнее постсинаптический ответ и надежнее передача возбуждения.

Известно, что синаптические контакты работают в режиме проведения высокочастотных и длительных серий нервных импульсов. Это приводит к быстрому уменьшению числа везикул в нервном окончании. Однако в естественных условиях наряду с экзоцитозом в нервном окончании постоянно образуются

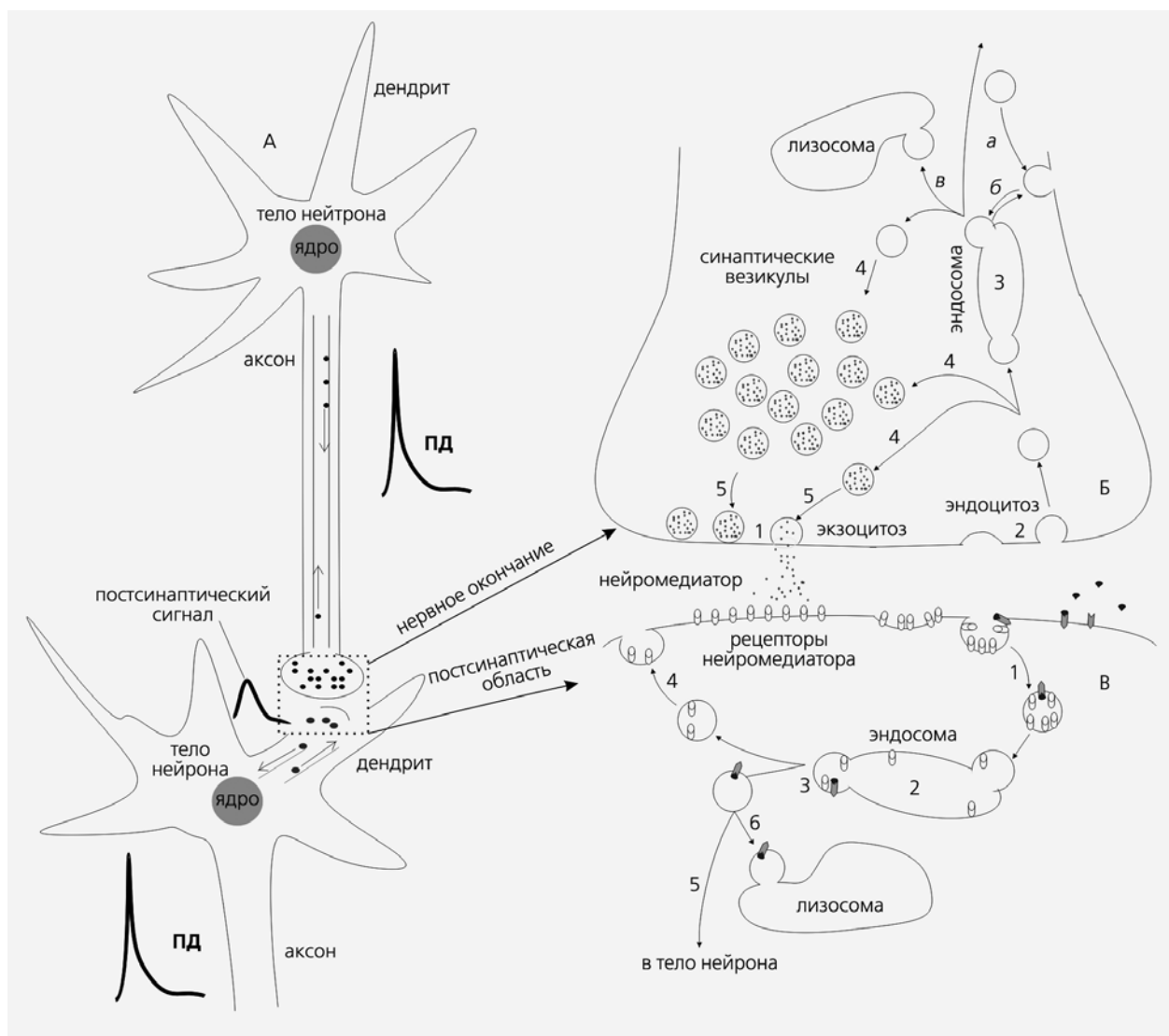


Рис.2. Везикулярные циклы в синапсе.

А — взаимодействие между нейронами. Длинный отросток нейрона (аксон) контактирует с коротким отростком (дендритом) другого нейрона. Возникший потенциал действия вызывает секрецию нейромедиатора, который быстро достигает рецепторов на постсинаптической мембране. Возникает постсинаптический сигнал, при достаточной величине которого во втором нейроне распространяется потенциал действия.

Б — пресинаптический везикулярный цикл включает: экзоцитоз (1), эндоцитоз (2), сортировку мембранного материала в эндосоме (3), транспорт везикул с включением в их популяцию (4) и последующую подготовку к экзоцитозу (5). Предшественники синаптических везикул образуются в нервной клетке (а); их созревание связано с несколькими раундами эндоцитоза (б), после чего они направляются в лизосомы для деградации (в).

В — постсинаптический везикулярный цикл. Некоторые рецепторы постсинаптической мембраны поглощаются в ходе эндоцитоза (1) и направляются в эндосомы (2). Часть рецепторов при необходимости может вернуться на поверхность клетки: с помощью клатринзависимого механизма отпочковывается несущая их везикула (3), которая сливается (4) с постсинаптической мембраной. Другие рецепторы доставляются в клетку (5) или отравляются в лизосомы (6).

новые везикулы (эндоцитоз), которые заполняются нейромедиатором, транспортируются в определенные регионы клетки и встают в очередь для повторного экзоцитоза. Совокупность

этих процессов получила название рециклирование, а постоянный кругооборот везикул — везикулярный цикл (рис.2,Б). Значение рециклирования везикул можно проиллюстрировать на

мутанте плодовой мушки *D.shibire*, у которой при высокой температуре эндоцитоз прекращается, количество синаптических везикул уменьшается и синаптическая передача нарушает-

ся. Такие мутанты в тепле парализованы и не могут летать [3].

В нервных окончаниях сосуществуют несколько вариантов эндоцитоза, для большинства которых требуется белок клатрин (рис.3). К несчастью, большинство опасных вирусов (вирусы бешенства, энцефалита, полиомиелита, гриппа, ретровирусы) и многие токсины (ботулизма, столбнячный, коклюшный) проникают в клетку именно благодаря эндоцитозу, зависящему от белка клатрина.

Сегодня выделяют две основных разновидности клатринзависимого эндоцитоза — быстрый и медленный [5]. При оценке кинетики этих процессов в двигательных нервных окончаниях выяснилось, что высокочастотную активность сопровождает быстрый эндоцитоз (везикулярный цикл 30—60 с), а после прекращения активности начинает работать медленный вариант (кругооборот везикул 5—15 мин). Выраженность того или иного типа эндоцитоза зависит от активности и вида синапса. Так, у мыши в двигательных нервных окончаниях преобладает быстрый эндоцитоз, а у лягушки в равной степени представлены оба варианта [5].

Быстрый эндоцитоз происходит на плоской поверхности мембраны, а медленный («объемный») — на поверхности эндосомоподобных структур (глубоких инвагинаций и вакуолей), образующихся после массового выброса медиатора [6]. Возможно, в таких мембранных лагунах в ходе эндоцитоза сортируются дефектные и нормальные нейрональные белки. Испорченные протеины в составе особых везикул направляются к эндосомам (внутриклеточным сортировочным станциям), где они либо исправляются, либо направляются в лизосомы для расщепления до аминокислот. Это обеспечивает безошибочную и длительную работу синаптического аппарата, поскольку при экзоцитозе белки везикул

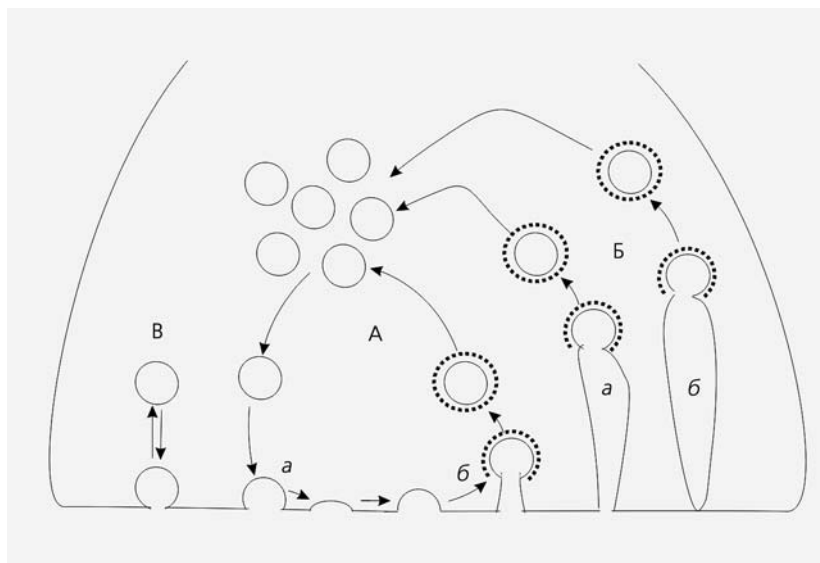


Рис.3. Варианты эндоцитоза в нервном окончании. А — после слияния везикулы с пресинаптической мембраной и выделения нейромедиатора (а) образуется новая везикула (б) с участием белка клатрина (показан пунктиром). Б — после полного слияния возникают крупные инвагинации (а), которые могут отщепляться от мембраны с образованием замкнутых цистерн, вакуолей (б, эндосомоподобных структур), с поверхности которых затем возникают новые везикулы. В — kiss-and-run-эндоцитоз осуществляется за счет формирования временной поры, после закрытия которой везикула отходит от пресинаптической мембраны.

вступают в многочисленные взаимодействия и сильно деформируются.

При низкочастотной активности синапса часть везикул может использовать сверхбыстрый эндоцитоз (от десятков миллисекунд до нескольких секунд), в шутку называемый механизмом kiss-and-run (в пер. с англ. — поцеловал и убежал). Тогда везикулы не сливаются с пресинаптической мембраной полностью, а формируется короткоживущая пора, через которую выделяется нейромедиатор. При этом эндоцитоз заключается в закрытии поры и отщеплении везикулы от мембраны (рис.3). В определенных условиях подобная ситуация встречается в синапсах гиппокампа, чащеобразных нервных окончаний ствола мозга, спинальных ганглий. В наших исследованиях kiss-and-run наблюдался в двигательных нервных окончаниях при увеличении осмотической внеклеточной среды.

В целом вопрос о том, встречается ли kiss-and-run в естественных условиях, остается пока без ответа [3].

Постсинаптический эндоцитоз

Клатриновый эндоцитоз с очень медленной кинетикой (несколько часов и более) обнаруживается в постсинаптических мембранах нервных клеток (рис.2,В). Он используется для удаления определенных рецепторов (глутаматных, β-адренорецепторов), что уменьшает чувствительность постсинаптической мембраны к этому нейромедиатору и приводит к уменьшению амплитуды постсинаптических сигналов, депрессии. Полный везикулярный цикл включает экзоцитоз везикул и эндосомальную сортировку (рис.2,В). Эндоцитозные везикулы с захваченными постсинаптическими рецепторами на-

правляются в эндосомы. При необходимости рецепторы возвращаются на поверхность нейрона: от эндосомы с помощью клатринзависимого механизма отпочковываются везикулы с белками-рецепторами, которые впоследствии сливаются (экзоцитоз) с постсинаптической мембраной. При этом ее чувствительность к нейромедиатору и, следовательно, «сила» синапса увеличиваются (долговременное возрастание амплитуды постсинаптических сигналов, потенциация). По последним данным, такое изменение количества постсинаптических рецепторов важно для многих интегральных процессов нервной системы (обучения, памяти, двигательного контроля и др.).

Постсинаптический эндоцитоз может регулировать синтез белков, в том числе рецепторов. Например, поглощаются активированные рецепторы факторов роста нервов, которые сортируются в эндосомах, а затем транспортируются в эндоцитозных везикулах в тело нейрона (рис.2,В). Там рецепторы благодаря своей ферментативной активности действуют на факторы, которые управляют считыванием информации с определенных генов и последующим синтезом белков (в том числе рецепторов к нейромедиаторам). Везикулы доставляют вновь образовавшиеся рецепторы обратно к постсинаптической мембране и встраиваются в нее, при этом она становится более восприимчивой к нейромедиатору.

Еще одна функция эндоцитоза в нервной системе связана со структурной реорганизацией синаптического аппарата. В ходе эндоцитоза с поверхности клеток могут удаляться значительные мембранные фрагменты, в итоге размеры пре- и постсинаптических мембран уменьшаются. Это, естественно, ослабляет передачу информации между нервными клетками. Аналогичный процесс может привести к исчезновению синапса [1].

Регуляция эндоцитоза

До последнего времени считалось, что передача информации в центральной и периферической нервной системах определяется только количеством освободившегося нейромедиатора (экзоцитозом) и чувствительностью к нему постсинаптической мембраны. На эти звенья и были направлены усилия по созданию лекарственных средств, корректирующих функцию нервной системы при нейродегенеративных и психических заболеваниях. Однако активность нейронных сетей в значительной степени зависит от эндоцитоза: увеличение его скорости усиливает общение между нервными клетками, а угнетение, напротив, сводит «переговорный» процесс к минимуму. Можно предположить, что первое поможет быстрее думать и запоминать, острее чувствовать и «выше прыгать», а второе спасет от чрезмерного возбуждения, навязчивых мыслей и ненужной информации. В настоящее время установлена связь многих заболеваний нервной системы с нарушениями в кругообороте синаптических везикул. Так, при эпилепсии обнаружены массивное неконтролируемое слияние везикул и интенсивный эндоцитоз. Значит, факторы, замедляющие его, смогут остановить приступ и перевести человека в нормальное состояние. При других болезнях (например, Альцгеймера, Гантингтона, Паркинсона), наоборот, эндоцитоз постепенно нарушается и нейропередача ослабевает. Тогда, если вернуть эндоцитозу прежнюю силу, можно замедлить или даже купировать развитие недуга.

В двигательных нервных окончаниях мы обнаружили внутриклеточные сигнальные системы, управляющие динамикой эндоцитоза и, таким образом, определяющие скорость везикулярного цикла и интенсивность повторного использования везикул [7, 8]. Оказалось, что сигнальный каскад цикли-

ческого гуанозинмонофосфата (цГМФ) служит мощным регуляторам скорости эндоцитоза. Так, повышение или снижение его продукции (синтез цГМФ осуществляется внутриклеточным ферментом гуанилатциклазой) соответственно ускоряет или ослабляет эндоцитоз везикул и соответственно усиливает или угнетает синаптическую передачу. Причем в этих случаях действие циклического гуанозинмонофосфата связано с цГМФ-зависимой протеинкиназой G 1-го типа [7]. Интересно отметить, что продукция цГМФ в клетке сильно зависит от оксида азота (NO вырабатывают многие клетки организма, в том числе нейроны), который вовлечен в обработку информации в мозге. Таким образом, если в определенной области мозга уровень NO повышен, то этот участок потенциально может работать более интенсивно. В этом случае NO, стимулируя образование циклического гуанозинмонофосфата, усиливает эндоцитоз, обеспечивая длительное увеличение силы синапса.

При изучении внутриклеточной передачи сигнала с помощью циклического аденозинмонофосфата (цАМФ) выяснилось более сложное воздействие на везикулярный цикл двигательного нервного окончания. Для эффективного эндоцитоза необходима фоновая активность цАМФ-системы, а блокирование синтеза цАМФ внутри клетки увеличивало площадь поверхностной мембраны нервного окончания. Возрастание же внутриклеточной концентрации цАМФ избирательно усиливало клатринзависимый эндоцитоз медленного типа, что должно содействовать более тщательной проверке целостности белков [8].

Сегодня накопилось множество данных об участии циклических нуклеотидов в развитии дисфункций нервной системы. Например, при старении в нейронах существенно ослабевает

активность цАМФ-зависимой системы. Учитывая полученные в нашей лаборатории результаты, возрастные изменения работы нервной системы можно представить как результат нарушения эндоцитоза. Причем в перспективе «испорченный» эндоцитоз, скорее всего, приведет к накоплению дефектных белков в поверхностной мембране, а это уже серьезная угроза жизни клетки.

Еще в середине прошлого века установили, что вход ионов Ca^{2+} через потенциалзависимые каналы стимулирует слияние синаптических везикул, т.е. экзоцитоз. Что касается роли внутриклеточных ионов Ca^{2+} в процессах эндоцитоза, то здесь не все так просто. Наши исследования показали, что эти ионы необходимы для запуска эндоцитоза (роль триггера), однако их высокая концентрация обратимо блокирует процесс, разделяя процессы экзо- и эндоцитоза. Кроме того, мы выяснили, что в синаптической щели ионы Ca^{2+} способствуют успешному эндоцитозу, влияя на липиды наружного монослоя мембраны [9].

В этом разделе мы привели только часть результатов наших исследований в области эндоцитоза синаптических везикул. Значительные усилия были также направлены на изучение липидного состава мембран (сфинголипидов, холестерина, фосфолипидов), цитоскелета, сигнальных газов (NO , CO , H_2S), ионного состава внеклеточной среды в эндоцитозе синаптических везикул, роли закисления внутриклеточной среды и усиленного образования активных форм кислорода. Все это необходимо, во-первых, для решения фундаментального вопроса нейробиологии о значении эндоцитоза в работе нервной системы, а во-вторых, для определения подходов, которые позволяют изменять динамику и интенсивность эндоцитоза в нервной системе.

Молекулярный механизм клатрин-опосредованного эндоцитоза

Обширные исследования молекулярных механизмов синаптического эндоцитоза говорят о том, что «затягивание» мембранного материала в нервную клетку происходит в основном за счет опосредованного эндоцитоза (рис.3). По форме белок клатрин напоминает ногу с коленом, благодаря гибкости которого молекула белка может «прилаживаться» к различным изгибам (рис.4). Один конец клатриновой ноги, направленный к мембране наподобие ступни, обеспечивает распознавание белков, участвующих в эн-

доцитозе (AP-2, AP-180, амфифизин, эпсин, аррестин). Противоположный конец ноги отвечает за объединение молекул клатрина в «трехногие» структуры — трискелии, которые могут соединяться в плоские или корзиноподобные решетки (рис.4).

Сначала адапторные белки (адаптирующие клатрин к поверхности) связываются с участком плазматической мембраны, затем к ним присоединяются клатриновые трискелии. Главный адапторный белок, AP-2, состоит из четырех субъединиц: малой (σ_2), средней (μ_2) и двух больших (α , β_2). Они образуют структуру, похожую на голову с симметричными подвижными ушами (рис.4). Голо-

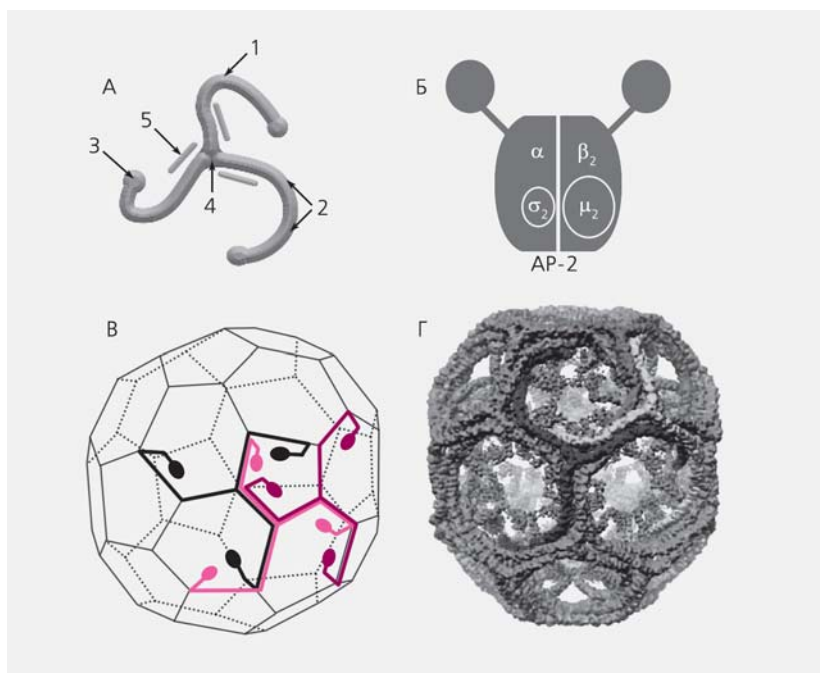


Рис.4. Основные компоненты клатринового покрытия.

А — структура клатринового тримера (трискелия) состоит из двух цепей — тяжелой (1—4) и легкой (5). Тяжелая цепь формирует структуру, напоминающую ногу с изгибом (коленом) посередине (1), который делит ее на две части (2). Один конец образует ступню (3), а с помощью противоположного конца (4) молекулы клатрина объединяются в трискелию. Легкая цепь (5) регулирует последующую сборку трискелий в клатриновые решетки (В, Г). Б — схема тетрамерного (большие субъединицы α и β_2 , средняя μ_2 и малая σ_2) адапторного белка AP-2, структура которого напоминает голову с двумя ушами. В — реконструкция закрытой клатриновой решетки, состоящей из шестиугольников и пятиугольников. Ступни клатрина показаны в виде овалов, обращенных внутрь решетки. Г — криоэлектронная микрофотография клатринового покрытия из 36 трискелий, организованных в 12 пятиугольников и шесть шестиугольников.

ва AP-2 прочно соединяется с фосфолипидами мембраны, а также взаимодействует с определенными аминокислотными последовательностями (эндоцитозными мотивами) и целыми доменами некоторых поглощаемых белков. При посадке на мембрану уши AP-2 комплекса ориентируются в сторону цитоплазмы, где они могут связываться с клатрином (рис.5). Однако для сооружения клатринового покрытия этого недостаточно. *In vivo* молекулы AP-2 группируются при участии тетрамерного белка Eps15, который одновременно взаимодействует с четырьмя AP-2 ком-

плексами. Так создается многоочечный крепеж (четыре AP-2×Eps15) для привлечения и последующей сборки клатринового покрытия. В ходе его образования специфичные липидные и белковые компоненты мембран синаптических везикул притягивают к себе клатриновые адапторы, а само покрытие — дополнительные везикулярные протеины. Такой механизм делает покрытие молекулярным сортировщиком определенных белковых грузов (белков, входящих в состав везикул).

В начальных этапах сборки клатрина участвуют также взаимодействующие с AP-2 белки

AP180/CALM и эпсин. Они связываются с фосфолипидами мембраны и некоторыми интегральными белками (везикулярным белком синаптобревином, участвующим в экзоцитозе). Кроме того, они содержат участки для прикрепления к клатрину, т.е. могут соединять фрагмент мембраны синаптических везикул с клатрином. Каждый из белков имеет свои особенности. Комплекс AP-180 катализирует очень быструю сборку клатрина, какую не может обеспечить ни один из белков самостоятельно. Эпсин же нужен для первоначального привлечения AP-2 в определенный участок плазм-

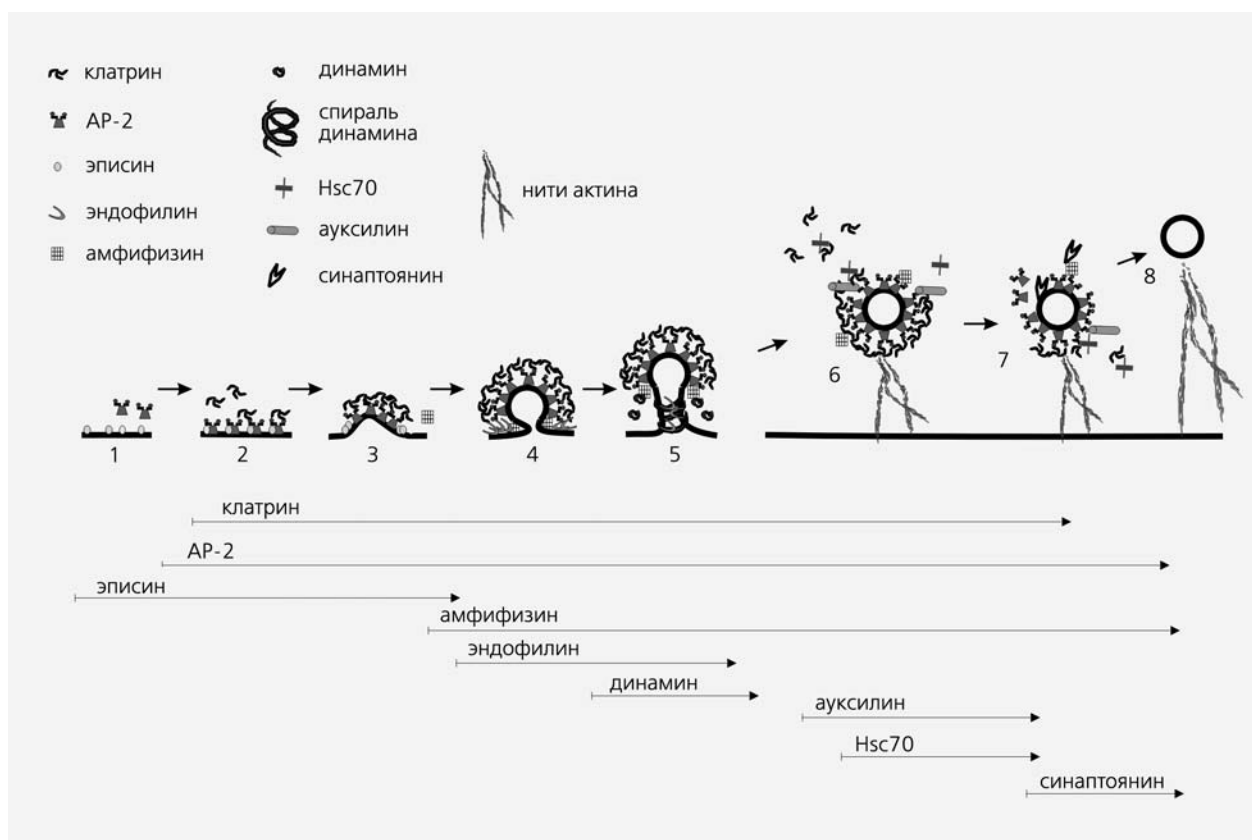


Рис.5. Этапы и механизм клатрин-опосредованного эндоцитоза. Сначала на мембрану высаживаются молекулы эпсина (1), которые облегчают последующее присоединение к этому участку адапторных комплексов AP-2 (2), а также белков AP-180, Eps15 (не показаны). Образовавшийся белковый ансамбль привлекает трискелии клатрина (2) и стимулирует их полимеризацию в решетку (3). Одновременно под влиянием эпсина (3), а затем эндофилина и амфифизина (4) везикулярная мембрана искривляется, что ведет к формированию глубоких ямок с клатриновым покрытием (4). При участии амфифизина белок динамин полимеризуется и образует узкий спиральный воротник (5), сдавливающий перешеек между ямкой и остальной мембраной. При затягивании воротника везикула отделяется (6), и покрытие послойно удаляется: клатриновая решетка (6) — шапероном Hsc70, а адапторные белки (7) — фосфатазой синаптоянином, которая привлекается к везикуле амфифизинном. Направленная полимеризация актина способствует перемещению везикулы (8).

матической мембраны (рис.5). AP-180 необходим на всем протяжении эндоцитоза, а эпсин перемещается за пределы покрытия до отщепления везикулы и вызывает изгибание обрастающей клатрином мембраны. Кроме того, эпсин (как и Eps15) может цеплять помеченные убиквитином белковые «грузы» (денатурированные белки синаптических везикул, рецепторы, ионные каналы). Убиквитин (пептид из 76 аминокислотных остатков) присоединяется к интегральным белкам с помощью фермента убиквитин-лигазы, что обычно служит своеобразной черной меткой. Она указывает на белки, которые необходимо направить в лизосомы для разрушения.

Изучение роли эпсина, Eps15 и AP-180 в формировании покрытых клатрином ямок послужили основой следующей гипотезы [10]. Сначала ограниченное число эпсинов подходит к плазматической мембране, за ними следуют AP-2, Eps15 и немного клатрина. Eps15 связывает четыре молекулы AP-2 и несколько AP-180, которые формируют комплекс, запускающий быструю полимеризацию клатрина. При этом эпсин активно вытесняется в краевую область покрытой мембраны, что вызывает начальный изгиб и формирование небольших ямок. Последующее искривление мембраны, ведущее к образованию глубоких ямок, покрытых клатрином, осуществляют другие белки — эндофилин и амфифизин (рис.5).

Способность эпсина, эндофилина и амфифизина искривлять мембрану зависит от присутствующей в их структуре амфифильной (имеющей и гидрофильные, и гидрофобные участки) α -спирали. Встраивание ее гидрофобных аминокислотных остатков во внутренний листок мембраны расталкивает головки липидов, увеличивая поверхность монослоя, при этом энергия, требуемая для искривления мембраны, уменьшается. Эндо-

филин имеет также липидмодифицирующую (ацилтрансферазную) активность, которая теоретически может влиять на кривизну бислоя. Определенную роль в затягивании покрытого клатрином участка, вероятно, играет перестройка актинового цитоскелета, поскольку там, где протекает эндоцитоз, часто обнаруживается густо развитая цитоскелетная сеть. Это подтверждается и нашими исследованиями, в которых показано угнетение эндоцитоза в двигательных нервных окончаниях при разнообразных воздействиях на цитоскелет. Недавно мы получили данные о необходимости для эндоцитоза холестерина, входящего в состав мембран синаптических везикул. Причем, скорее всего, он требуется на этапе искривления мембраны в покрытую клатрином почку.

Биохимическим способом очищенные молекулы клатрина могут самопроизвольно собираться в закрытые корзины (рис.4), т.е. изгиб клатриновой корзины — это внутренняя характеристика покрытия. Поэтому не исключается, что полимеризация клатрина способствует инвагинации мембраны. Однако, как показывает большинство исследований, сборка клатрина пассивно следует за изгибом мембраны, а клатриновое покрытие необходимо для фиксации и стабилизации почкующейся мембраны. Клатриновое покрытие участвует в почковании мембран по принципу «броуновской защелки», согласно которой изначально плоская мембрана искривляется под действием случайных тепловых флуктуаций и специфичных белков. Клатриновое покрытие приспособляется к новой кривизне и поддерживает обращенные внутрь деформации плазматической мембраны, пока не будет достигнута оптимальная кривизна.

Глубокие покрытые ямки характеризуются присутствием в области соединения почки

с плазматической мембраной структуры, внешне напоминающей шею (рис.5). Это место разделения мембран, в котором участвуют по крайней мере три белка: эндофилин, амфифизин и динамин (это общее имя трех генов малых ГТФаз: первый экспрессируется в мозгу, второй — повсеместно, третий — в яйцках). На одном конце динаминов располагается ГТФазный домен (катализирующий превращение гуанозинтрифосфата в гуанозиндифосфат), а на другом — структура, названная GED (эффекторный домен ГТФазы), которая участвует в образовании тетрамера (*in vivo* — структурная единица динамина).

Поэтапно разделение мембран представляется следующим образом: 1 — к покрытию и подлежащей мембране крепится амфифизин, который привлекает из цитоплазмы тетрамер динамина в ГДФ-загруженном состоянии; 2 — динамин дополнительно связывается с фосфолипидами мембраны; 3 — в результате этих взаимодействий ГДФ заменяется на ГТФ (ГДФ отсоединяется от молекулы динамина, а на его место из цитоплазмы захватывается ГТФ), что ведет к отделению динамина от покрытия; 4 — динамин, содержащий ГТФ, самопроизвольно собирается на шейке ямки в кольца и спирали; 5 — полимеризация динамина увеличивает его ГТФазную активность в 50 раз, а при гидролизе ГТФ конфигурация динаминового воротника изменяется; 6 — в результате отделяется покрытая везикула; 7 — содержащие ГДФ агрегаты динамина распадаются.

Возможны два механизма работы полимеров динамина. Первый: динаминово кольцо физически сдавливает шейку до тех пор, пока она не разрушится (механизм защемления); второй: динаминовая спираль вытягивается (увеличение шага между двумя витками в два раза), при гидролизе ГТФ может разделять мембраны (пружиноп-

добный механизм выталкивания). В обоих случаях динамин служит механохимическим ферментом, преобразующим энергию ГТФ в силу. Однако существуют предположения, что динамин контролирует отделение везикул не в одиночку. Активированный ГТФ-содержащий динамин, действуя как типичная сигнальная малая ГТФаза, способен передавать сигнал эндофилину, сконцентрированному на мембране между двумя кольцами динамина. После этого эндофиллин начинает конденсировать лизофосфатидную и жирную кислоты в фосфатидную, что само по себе достаточно для формирования везикулы из почки. Кроме того, дополнительное усилие, облегчающее отрыв везикулы, может обеспечить сборка актиновых филаментов, запускаемая ГТФазным доменом динамина.

После разделения мембран везикулы быстро теряют клатриновое покрытие (рис.5). Ключевая роль в этом принадлежит шаперону* Hsc70, который предотвращает непродуктивные взаимодействия между молекулами клатрина. Разборка покрытия начинается с того, что вспомогательный белок (кошаперон) ауксиллин связывается с клатриновым покрытием. Затем к ауксиллину притягивается из цитоплазмы белок Hsc70, со-

* Шапероны — белки, помогающие исправить искаженную структуру других белков.

державший АТФ. В результате взаимодействий с ауксиллином возрастает АТФазная активность (способность удалять фосфатные группы молекулы АТФ) Hsc70, и он переходит в АДФ-затянутое состояние. АДФ-Hsc70 крепко связывается с клатрином, искажая конформацию и способствуя разборке решетки на отдельные трискелии. В цитоплазме Hsc70 освобождает и заново связывает клатрин, стабилизируя его для последующей повторной сборки на плазматической мембране.

Для удаления адапторных белков с поверхности везикулы необходимо дефосфорилирование инозитольного кольца мембранных липидов, поскольку на них и крепятся адапторные молекулы. Остатки фосфорной кислоты от инозитольного кольца головной гидрофильной группы фосфолипидов отщепляет фосфатаза синаптоянин [6].

В живой клетке помимо перечисленных белков в работе клатринового покрытия участвуют еще несколько десятков белков. Часть из них обнаруживается в покрытых клатрином ямках, а другие взаимодействуют с клатриновым покрытием на отдельных этапах. Сходные с клатрин-опосредованным эндоцитозом процессы задействованы при образовании везикул из мембран внутриклеточных органелл (эндосом, эндоплазматического ретикулума, комплекса Гольджи, лизосом). Подобные

механизмы включают те же этапы — прикрепление адапторных белков к участку мембраны, образование покрывала из клатрина (или родственных ему белков), затем искривление покрытой мембраны и формирование мембранной почки, отделяющейся с помощью динамина от органоида клетки, после чего в цитоплазме появляется «одетая» в покрытие везикула, которая в следующий момент освобождается от клатрина и адапторных белков.

* * *

Исследование молекулярных механизмов эндоцитоза и роли везикулярного цикла в синаптической передаче — новый этап в изучении функции центральной и периферической нервной систем. Накопление знаний о процессах эндоцитоза, рециклирования и транспорта синаптических везикул, определение путей регуляции позволит выйти на новые механизмы, управляющие силой синаптических контактов. Эти исследования могут стать важным ключом к пониманию многочисленных интегративных функций головного мозга, лежащих в основе памяти и обучения. Кроме того, создание фармакологических препаратов, избирательно влияющих на динамику и интенсивность эндоцитоза, может стать поворотной точкой в борьбе со многими тяжелыми заболеваниями нервной системы. ■

Литература

1. Conner D.S., Schmid S.L. // Nature. 2003. V.422. P.37—44.
2. Paolo G.di, Cailli P.de // Nature. 2006. V.443. P.651—657.
3. Зефирова А.Л. // Рос. физиол. журнал. 2007. Т.93. №5. С.554—563.
4. Jung N., Haucke V. // Traffic. 2007. V.8. P.1129—1136.
5. Зефирова А.Л., Захаров А.М., Мухаметзянов Р.Д., Петров А.М. // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2008. Т.44. №6. С.603—612.
6. Granseth B., Odermatt B., Royle S.J. // J. Physiol. 2007. V.585. №3. P.681—686.
7. Petrov A.M., Giniyatullin A.R., Sitdikova G.F., Zefirov A.L. // J. Neurosci. 2008. V.28. №49. P.13216—13222.
8. Petrov A.M., Giniyatullin A.R., Zefirov A.L. // Neurochem. J. 2008. V.2. №3. P.175—182.
9. Zefirov A.L., Abdrakhmanov M.M., Mukhamedyarov M.A., Grigoryev P.N. // Neurosci. 2006. V.143. P.905—910.
10. Mousavi S.A., Malerod L., Berg T., Kjekken R. // Biochem. J. 2004. V.377. P.1—16.

На пути от оптического лазера к атомному

Е.Д.Трифонов, Ю.А.Аветисян

В середине 90-х с помощью лазерного охлаждения удалось получить бозе-эйнштейновский конденсат разреженного газа, существование которого было теоретически предсказано А.Эйнштейном еще в 1925 г. [1]. Реализация эксперимента по рассеянию света на такой системе позволила осуществить генерацию когерентных волн материи — атомных волн с длинами волн, принадлежащими оптическому диапазону [2—4]. Об этих результатах и их теоретической интерпретации и пойдет речь.

Охлаждает лазер

Охлаждение вещества до все более низких температур — традиционная «магистраль» физического эксперимента, заложенная еще М.Фарадеем, движение по которой привело ко многим открытиям. Долгое время методика охлаждения была основана на процедуре сжижения газов; минимальная температура, достигнутая с помощью сжижения гелия, составляла около 1 К. Теперь же, благодаря современным технологиям, этот рубеж оставлен позади, и новые открытия не заставили себя ждать.

Как известно, температура определяется средней кинетической энергией частиц газа, т.е. пропорциональна среднему значению квадрата скорости частицы. В наши дни появились



Евгений Дмитриевич Трифонов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и астрономии Российского государственного педагогического университета им.А.И.Герцена (Санкт-Петербург). Занимается нелинейной квантовой оптикой.



Юрий Арташесович Аветисян, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН (Саратов). Область научных интересов — теория дифракции и нелинейная оптика.

методы охлаждения газа, использующие прямое воздействие на частицы, которое приводит к снижению их скоростей, — так называемые методы лазерного охлаждения [5]. При поглощении фотона, излучаемого лазером, атом получает импульс, равный импульсу фотона $\hbar\omega/c$, где ω — частота лазера, \hbar — постоянная Планка, c — скорость света. Если атом движется навстречу лазерному лучу, после поглощения фотона его скорость уменьшится. Изменение скорости атома Δv определяется из закона сохранения

импульса $\hbar\omega/c = \Delta v \cdot m$ и зависит не только от частоты поглощенного фотона, но и от массы атома m . Например, для атома натрия (при $\omega = 3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ и $m \approx 4 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$) $\Delta v \approx 3 \text{ см/с}$. Так как при комнатной температуре скорость атома натрия имеет порядок 100 м/с, для «полной» его остановки требуется около 10 тыс. актов поглощения. Если же атом движется по направлению лазерного луча, то поглощение фотона приведет, наоборот, к повышению скорости атома. Поскольку в газе атомы имеют хаотически направленные

© Трифонов Е.Д., Аветисян Ю.А., 2009

ные скорости, надо позаботиться о том, чтобы сделать второй процесс менее эффективным, чем первый. Один из приемов такого охлаждения был предложен американскими физиками А.Шавловым и Т.Хэншем — надо использовать эффект Доплера и облучать атомы светом с частотой, меньшей резонансной частоты поглощения атома. Форма линии спектра поглощения имеет вид лоренцевой кривой, представленной на рис.1. Положение максимума задается резонансной частотой атома ω_0 , а ширина — так называемой радиационной константой γ , обратная величина которой определяет время затухания спонтанного излучения. Согласно эффекту Доплера атом, движущийся навстречу лазерному пучку, воспринимает частоту облучения как более высокую, а попутный атом — как более низкую. Понятно, что сместив частоту лазера в красную сторону от резонансной частоты, мы сделаем более вероятным поглощение встречным атомом,

чем попутным. Такой метод охлаждения был назван доплеровским. На практике лазерное охлаждение осуществляется тремя парами встречных лазерных пучков, направленными вдоль ортогональных осей. После каждого поглощения атом спонтанно испускает вторичный фотон и при этом тоже получает импульс отдачи. Но поскольку спонтанное излучение происходит в произвольном направлении, суммарным изменением скорости атома за счет отдачи спонтанно испущенных фотонов можно пренебречь. В то же время роль этого излучения очень важна — оно обеспечивает закон сохранения энергии. Его частота в среднем совпадает с резонансной частотой и, следовательно, оказывается больше частоты лазерных пучков. Поэтому энергия спонтанно испущенных фотонов должна превышать энергию поглощенных фотонов, включая в себя убыль кинетической энергии атомов. Метод доплеровского охлаждения был впервые реализован

американскими физиками С.Чу и В.Филлипсом, которым вместе с французским теоретиком К.Коэн-Таннуджи в 1996 г. присудили Нобелевскую премию [6]. Интересно, что минимальная температура охлаждения, которая может быть достигнута таким образом, определяется из соотношения $kT_{\min} = \hbar\gamma$, где k — постоянная Больцмана. Для характерного значения $\gamma \approx 10^7 \text{ с}^{-1}$ получаем $T_{\min} \approx 10^{-5} \text{ К}$. Позднее были изобретены методы и более глубокого лазерного охлаждения.

В каком «сосуде» находится газ, подвергающийся лазерному охлаждению? Этот сосуд называют магнитной ловушкой — он не имеет материальных стенок, но надежно удерживает атомы. Магнитная ловушка образуется в неоднородном магнитном поле, создаваемом системой соленоидов. В силу известного эффекта Зеемана в магнитном поле происходит расщепление уровней энергии атома, величина которого пропорциональна магнитной индукции. При установлении термодинамического равновесия атом стремится перейти в состояние с наименьшей энергией. Если магнитное поле неоднородно, значение минимальной энергии будет зависеть от положения атома и достигается в той точке, где поле максимально. Около этой точки образуется потенциальная яма, которая и играет роль ловушки. Чтобы освободить атомы из ловушки, достаточно выключить магнитное поле. Если поле полностью не выключать, а только понизить его величину, потенциальная яма станет менее глубокой и более энергичные атомы смогут преодолеть потенциальные барьеры и покинуть потенциальную яму. В яме останутся атомы с меньшей энергией, т.е. газ с более низкой температурой. Такой метод охлаждения называют испарительным. Ясно, что его осуществление достигается ценой уменьшения количества охлаждаемого вещества.

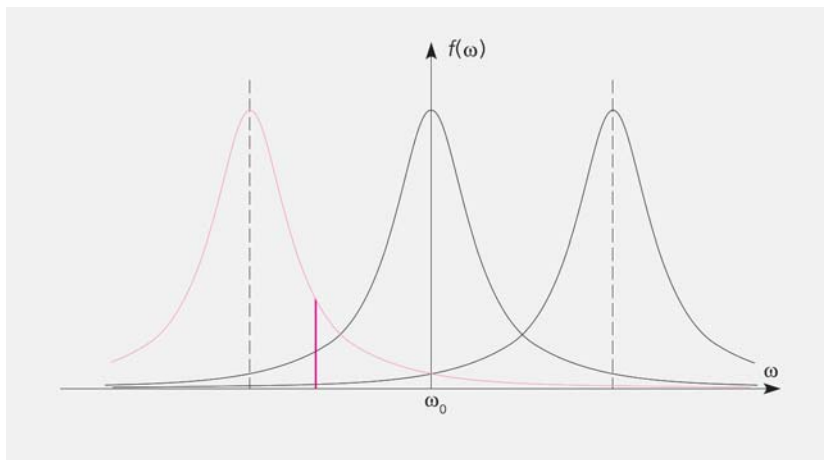


Рис.1. Механизм доплеровского охлаждения. Три кривые представляют собой графики вероятности поглощения фотона атомом: центральная кривая — для поглощения лазерного фотона с частотой ω неподвижным атомом (ω_0 — резонансная частота перехода в атоме); левая кривая — для поглощения фотона атомом, движущимся навстречу лазерному лучу, правая — для поглощения фотона атомом, движущимся в направлении распространения лазерного луча. Если частота лазера, помеченная вертикальной прямой, сдвинута в красную сторону относительно резонансной частоты атома, то вероятность поглощения фотона атомом, движущимся навстречу лазерному лучу, будет больше, чем вероятность поглощения «убегающим» атомом.

Когда холодно — лучше быть вместе

При достаточно низких температурах атомы газа обнаруживают квантовые статистические свойства, связанные с неразличимостью тождественных частиц. Это имеет место даже в том случае, когда атомы слабо взаимодействуют друг с другом, т.е. газ можно считать идеальным. Как известно, волновые свойства свободной частицы характеризуются длиной волны де Бройля $\lambda = 2\pi\hbar/p$, которая зависит от импульса частицы $p = mv$. При высоких температурах частицы имеют большие скорости и, следовательно, малые длины волн де Бройля. Квантовые свойства идеального газа начинают проявляться, когда при понижении температуры длина волны де Бройля становится сравнимой со средним расстоянием между частицами. Среднюю кинетическую энергию частицы (атома) по порядку величины можно оценить как $p^2/m \sim kT$. Отсюда $p \sim \sqrt{mkT}$ и $\lambda \sim \hbar/\sqrt{mkT}$. Если среднее расстояние между атомами есть a , то концентрация атомов, т.е. число атомов в единице объема, будет $n = a^{-3}$. Отсюда получаем $a \sim n^{-1/3}$. Условие квантового предела $\lambda \sim a$ может быть теперь записано как $\hbar(mkT_{\text{кв}})^{-1/2} \sim n^{-1/3}$, откуда находим $T_{\text{кв}} \sim \hbar^2 n^{2/3}/mk$. При температурах порядка $T_{\text{кв}}$ и ниже газ проявляет квантовые свойства (например, для паров натрия при концентрации $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ имеем $T_{\text{кв}} \sim 10^{-6} \text{ К}$).

В чем же заключаются эти свойства? Мы будем рассматривать газ, состоящий из тождественных частиц. Квантовые свойства, которые будут существенны для нас, зависят от спина частиц. Как известно, проекция спина на заданное направление может принимать значения, кратные \hbar или $\hbar/2$. В первом случае спин называют целым, во втором — полуцелым. Для частиц с полуцелым спином выполняется принцип запрета Паули: в одном состоянии не мо-

жет находиться более одной частицы. Для частиц с целым спином такого запрета нет — в каждом состоянии может находиться любое число частиц. Это так называемая теорема о связи спина и статистики. Хотя формально сама связь возникает из требования инвариантности квантовой теории относительно инверсии времени, пространства и заряда, трудно осознать физические причины такой корреляции для системы не взаимодействующих друг с другом частиц. Сам В.Паули, который внес главный вклад в открытие данной закономерности, признавался в одной из статей, что «окончательная истина этого вопроса все еще пребывает в бездне неизведанного». Тем не менее эта связь имеет многочисленные экспериментальные подтверждения. Обсуждению одного из таких экспериментов и посвящена данная статья. Так как далее нас будут интересовать частицы с целым спином — их называют бозонами, — мы ограничимся только этим случаем.

От того, сколько частиц может находиться в одном состоянии, зависит закон распределения частиц по энергиям при термодинамическом равновесии. При допущении произвольных чисел заполнения состояний такое распределение впервые было получено А.Эйнштейном, использовавшим метод индийского физика Ш.Бозе, который тот предложил для вывода формулы Планка. Поэтому данное распределение получило впоследствии имя Бозе—Эйнштейна. В своих рассуждениях ни Бозе, ни Эйнштейн не использовали связь спина и статистики, которая тогда была неизвестна, а просто исходили из допущения, что в каждом состоянии, независимо от величины спина, может находиться произвольное число частиц. При этом состояние всей системы определялось заданием только чисел заполнения одноатомных состояний без учета различных

возможных вариантов заполнения их конкретными частицами — так неявно был введен принцип неразличимости тождественных частиц. Эйнштейн также показал, что при понижении температуры ниже некоторого критического значения, имеющего порядок величины $T_{\text{кв}}$, при термодинамическом равновесии часть атомов газа конденсируется в одном состоянии с минимальной энергией. Эту фракцию газа теперь мы называем бозе-эйнштейновским конденсатом, сокращенно — БЭК. Отметим, что в работе Эйнштейна не учитывалось взаимодействие между атомами, т.е. рассматривался идеальный газ. Статья Эйнштейна так и называлась: «Квантовая теория одноатомного идеального газа» [1].

Предсказание Эйнштейна об образовании БЭК идеального, т.е. сильно разреженного, газа было подтверждено сравнительно недавно — только в середине 90-х годов прошлого столетия. Связано это с тем, что для получения конденсата разреженного атомарного газа требуются сверхнизкие температуры. Чем более разрежен газ, тем ниже значение критической температуры. Может возникнуть вопрос, зачем брать такой разреженный газ? Дело в том, что если охладить не столь разреженный газ, из-за межатомного взаимодействия вместо БЭК возникнет обычный конденсат, т.е. образуется жидкая, а затем и твердая фаза вещества. Поэтому возможность демонстрации БЭК идеального газа появилась лишь после разработки эффективных способов охлаждения, о которых мы рассказали выше. Экспериментальное получение БЭК разреженного газа также было отмечено Нобелевской премией в 2001 г. (В.Кеттерле, К.Виман, Э.Корнелл) [7].

Что собой представляет БЭК разреженного газа как физический объект? Мы приведем здесь лишь качественное пояснение, не останавливаясь на деталях, связанных с конфигурацией ло-

вушки. В идеальном случае это газ невзаимодействующих частиц (бозонов). Каждая из частиц находится в основном состоянии, которое описывается волновой функцией — стоячей волной де Бройля, половина длины волны которой равна линейному размеру объема, занимаемого конденсатом. Интенсивностью такой волны определяется вероятность обнаружить частицу в данном месте пространства. Сама по себе волна не наблюдаема. Более того, попытка «сфотографировать» частицу с помощью поглощения фотона разрушает ее исходную волновую функцию. В случае БЭК идеального газа, в силу теоремы о связи спина и статистики, которая упоминалась выше, волны де Бройля для всех частиц должны быть одинаковыми (более строго, волновая функция системы бозе-частиц должна оставаться неизменной при перестановке любой пары этих частиц). Это реальный пример многочастичного когерентного состояния, которое обладает свойствами, знакомыми нам по лазерному излучению. Так, экспериментально было подтверждено, что при наложении двух независимых конденсатов, состоящих из тождественных частиц, происходит их интерференция [2].

Как конденсат рассеивает свет

Группа Кеттерле, работавшая в Массачусеттском технологическом институте (США), поставила эксперименты по рассеянию света на БЭК паров натрия и рубидия [2–4]. Натрий и рубидий имеют полуцелый электронный спин и полуцелый ядерный спин, так что полный спин атомов целый. Поэтому натрий и рубидий — бозе-частицы, и при достаточно низком охлаждении возможно достижение состояния БЭК.

Несколько слов о физическом механизме процесса рассеяния. Рассеяние света — это

двухфотонный процесс. На атом падает фотон возбуждающего света, и атом преобразует этот фотон в рассеянный фотон, который испускается в произвольном направлении. При этом если бы атом возвращался в свое исходное состояние, по закону сохранения энергии частота ω рассеянного фотона должна была бы равняться частоте ω_0 падающего фотона. Отметим, что поскольку частота падающего фотона не обязана находиться в резонансе с частотой перехода в атоме, то реального акта его поглощения не происходит, и частота рассеянного фотона не совпадает с резонансной частотой излучения атома. Это именно процесс *преобразования* падающего фотона в рассеянный, процесс, который не сводится к последовательности двух реальных актов: поглощению и излучению. Однако для наглядности объяснения процесса рассеяния эти термины часто используют, прибавляя к ним эпитет «виртуальные». Кроме закона сохранения энергии должен выполняться еще закон сохранения импульса. Известно, что фотон обладает импульсом, направление которого определяется направлением распространения фотона, а величина, как уже отмечалось выше, равна $\hbar\omega/c$. Если импульс падающего фотона обозначить k_0 , а рассеянного — k , то в результате рассеяния атом должен получить импульс $p = k_0 - k$. Если считать, что вначале атом бозе-эйнштейновского конденсата покоился, то он должен приобрести кинетическую энергию $p^2/2m$. Это дает небольшую поправку к частоте рассеянного фотона, которая может быть легко вычислена из закона сохранения энергии $\hbar\omega_0 = \hbar\omega + p^2/2m$. Интересно, что этот небольшой сдвиг частоты рассеянного света как раз был обнаружен в рассматриваемом эксперименте.

Первоначально объяснение рассеяния света было получено на основе классической электродинамики и связано с именем

Дж.Рэля. Рэлеевское рассеяние — тот самый процесс, который позволяет нам любоваться голубым цветом неба. Падающая электромагнитная волна воздействует на электронную оболочку атома и вызывает в нем переменный дипольный момент, который в свою очередь служит источником излучения вторичной, или, как говорят, рассеянной, электромагнитной волны с такой же частотой, как и у падающей. Из-за того, что атомы газа распределены в пространстве хаотически, интерференцией рассеянных различными атомами волн в среднем можно пренебречь и рассматривать интенсивность рассеянного излучения как сумму интенсивностей излучений от каждого атома. Это — характерная черта рэлеевского рассеяния, объясненная позже М.Смолуховским. Когда интенсивность рассеянного света оказывается достаточно высокой, возникает эффект вынужденного рассеяния. И здесь возможны две ситуации. Если газ плотный, из-за межатомного взаимодействия (из-за столкновений) происходит сбой фаз дипольных моментов атомов, и поэтому интерференция излучаемых ими полей отсутствует. В этом случае интенсивность рассеянного излучения по-прежнему вычисляется как суммарная интенсивность рассеяния отдельными атомами. Но если взаимодействие между атомами слабо, что имеет место для разреженного газа при низких температурах, будет происходить конструктивная интерференция рассеянных полей, и интенсивность рассеяния окажется пропорциональной квадрату числа атомов. Такой тип рассеяния называют сверхизлучательным. Бозе-эйнштейновский конденсат — удобный объект для исследования сверхизлучательных эффектов [8]. Статья Кеттерле с сотрудниками, в которой был описан обсуждаемый эксперимент, называлась «Сверхизлучательное рэлеевское рассеяние света на бозе-эйнштейновском конденсате» [2].

Схема эксперимента и его результаты приведены на рис.2. Опыт состоял в том, что бозе-эйнштейновский конденсат паров натрия, локализованный в магнитной ловушке, облучался монохроматическим лазерным пучком с частотой, близкой (но не равной) частоте одного из переходов в атоме натрия. Ловушка имела сигарообразную форму. Облучение проводилось в поперечном направлении, а рассеяние света происходило в основном вдоль оси вытянутого объема конденсата и носило сверхизлучательный характер.

При рассеянии лазерного фотона атом получал импульс в направлении облучения и такой же по величине импульс отдачи от рассеянного фотона в продольном направлении. Результирующий импульс атома оказывался направленным под углом в 45° по отношению к направлению лазерного пучка. Если такой атом еще раз участвовал в акте рассеяния, он получал дополнительный импульс. В результате неподвижное облако конденсата превращалось в суперпозицию облаков, постепенно движущихся с различными скоростями. Облучение лазером продолжалось в течение нескольких микросекунд, а затем ловушка выключалась, предоставляя атомным облакам двигаться в соответствии с приобретенными скоростями. Эти облака, порожденные в ловушке, удалось «сфотографировать», поскольку через несколько миллисекунд они уже занимали различные положения в пространстве (см. рис.2). Де-бройлевская длина волны атомов в облаках задается импульсом атома и поэтому имеет порядок величины длины волны лазерного пучка. Таким образом, данный эксперимент можно было интерпретировать как генерацию когерентных волн материи с длинами волн, близкими к оптическому диапазону. Каждое из таких облаков представляет собой движущийся с определенной скоростью конденсат, или коге-

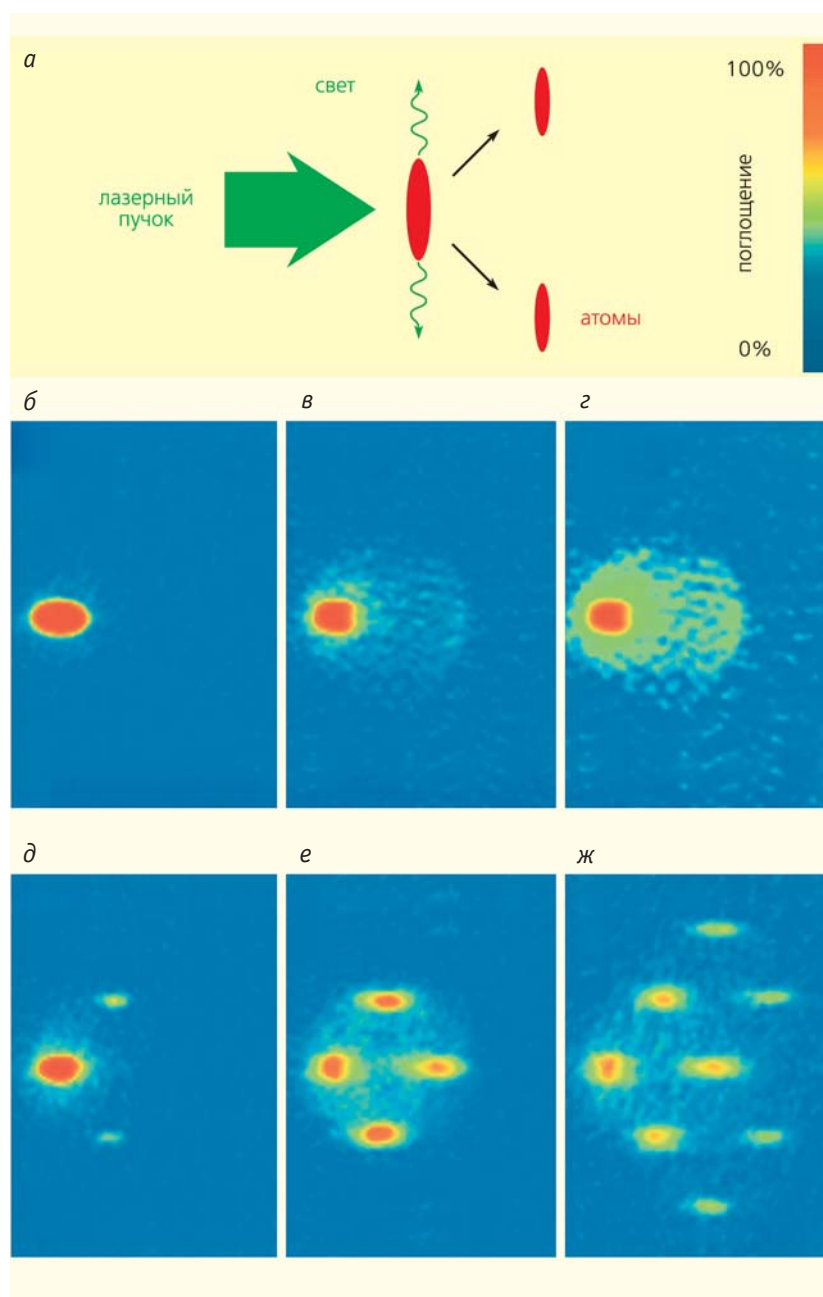


Рис.2. Образование когерентных атомных облаков при рассеянии света на бозе-эйнштейновском конденсате [2]. В верхней части рисунка (а) показана схема эксперимента: бозе-эйнштейновский конденсат в вытянутой ловушке облучается лазерным пучком. В том случае, когда лазерный луч поляризован параллельно оси конденсата, возникает слабое рэлеевское рассеяние (б, в, г). При поляризации лазерного луча перпендикулярно оси конденсата наблюдается интенсивное и узконаправленное рассеяние света вдоль оси конденсата (д, е, ж). Различие двух режимов связано с тем, что поляризация рассеянного поля должна совпадать с поляризацией возбуждающего лазерного поля (в первом случае излучение вдоль оси конденсата невозможно, так как поляризация поля и направление излучения всегда взаимно ортогональны). После выключения ловушки атомам предоставляется возможность свободно перемещаться в пространстве в соответствии с полученными при рассеянии света импульсами. Спустя 20 мс положение атомных облаков регистрировалось с помощью фотопоглощения.

рентную атомную волну. Способ генерации когерентных квантовых волн материи теперь принято называть атомным лазером. Можно сказать, что авторы экспериментов [2–4] — пионеры в данной области атомной оптики.

Теоретический взгляд

Теоретически явление, о котором шла речь, удалось описать достаточно полно. Конечно, здесь невозможно подробно изложить эту теорию. Для интересующихся мы дадим лишь ссылку на наши последние статьи [9, 10], в которых можно найти библиографию по данной проблеме. Отметим, что эффективная теоретическая интерпретация рассеяния света на БЭК представляет собой сочетание квантово-механического описания состояний атомов (как электронных, так и связанных с поступательным движением) и классической электродинамики, т.е. совместное реше-

ние нестационарного уравнения Шрёдингера и волнового уравнения, описывающего вторичное поле излучения атомов. Поэтому систему уравнений, лежащую в основе нашего рассмотрения, мы называем системой уравнений Максвелла—Шрёдингера. В математическом плане задача сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений, которое приходится осуществлять численно на компьютере. Хотя эта система уравнений может быть записана в компактной форме, мы не будем приводить ее здесь, поскольку пояснение обозначений утомило бы читателя. То, что атомы находятся в состоянии БЭК, отражается только в начальных условиях: полагается, что в начальный момент времени все атомы разреженного газа имеют нулевую скорость и их столкновениями можно пренебречь. В общем, можно сказать, что это квантово-механическая теория рассеяния света на БЭК идеального газа. Наш теоретический подход мы про-

иллюстрируем лишь схемой учитываемых переходов под действием электромагнитного поля. На первый взгляд кажется, что в соответствии с постановкой эксперимента достаточно рассмотреть взаимодействие с тремя модами электромагнитного поля: лазерным полем, распространяющимся в поперечном направлении по отношению к оси конденсата, и двумя модами вдоль оси, представляющими поле рассеяния. Простейшая схема переходов представлена на рис.3.

Квадратом здесь обозначено исходное состояние атома в БЭК, т.е. основное электронное состояние атома с нулевым значением импульса поступательного движения. Кружками — состояния атомов со значениями импульса, составляющие которого в условном масштабе соответствуют координатам центров кружков на плоскости k_x, k_y . При этом белые кружки обозначают основные электронные состояния, а желтые — возбужденные, в которые переходит атом при действии на него почти резонансным монохроматическим излучением. Такие состояния называют еще «одетыми»; их уровень энергии с хорошей точностью совпадает с частотой возбуждающего излучения, умноженной на постоянную Планка. Например, первый справа от конденсата верхний белый кружок обозначает основное состояние атома с составляющими импульса k_x, k_y , где k — абсолютное значение импульса лазерного фотона. Справа от него желтый кружок обозначает «одетое» возбужденное электронное состояние с импульсом поступательного движения $2k_x, k_y$ и т.д. Белые кружки на этой схеме соответствуют атомным облакам, которые возникают в результате рассеяния света (ср. с рис.2). Стрелками обозначены моды поля, которые вызывают «переходы» между указанными состояниями. Лазерное поле изображено синей стрелкой. Слово «переходы» взято в кавычки, поскольку

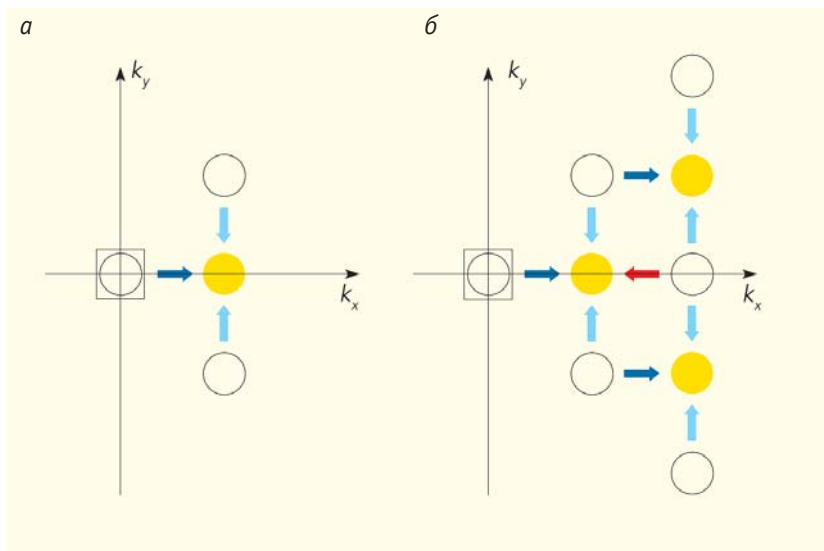


Рис.3. Схема атомных состояний, определяющих процесс сверхизлучательного рассеяния света: однократное (а) и двукратное (б) рассеяние света. Белыми кружками изображены основные электронные состояния, желтыми — возбужденные. Координаты положения кружка x и y определяют составляющие импульса поступательного движения атома. Стрелками показаны моды электромагнитного поля, связывающие соответствующие состояния: синие стрелки — лазерное поле, голубые стрелки — поле рассеяния вдоль оси конденсата, красная стрелка — поле отражения.

ку, как мы говорили выше, реально такие переходы не происходят. Отметим также, что стрелка указывает только направление распространения моды поля, а виртуальные переходы для каждой пары смежных состояний идут в обе стороны. Переход из возбужденного электронного состояния в невозбужденное сопровождается рождением или усилением соответствующей моды. Как раз благодаря этому и возникает рассеяние света вдоль конденсата, которое изображено зелеными стрелками.

Но изображенная схема переходов не полна. Прежде всего, как подчеркнули авторы эксперимента, следует учитывать возбуждение атома конденсата и полем рассеяния. Кроме того, теоретически переходы возможны для любой пары ближайших соседей в нашей «решетке переходов», которая может быть неограниченно расширена во всех направлениях. В результате мы получаем схему переходов, изображенную на рис.4.

Здесь следует обратить внимание на две особенности. Во-первых, появляются атомные облака, движущиеся в направлении, противоположном направлению лазерного луча. Это объясняется тем, что возбуждение атома может происходить под действием поля рассеяния, а излучение — под действием поля лазерной накачки. Поскольку такой испускаемый фотон будет распространяться в направлении лазерного пучка, атом будет получать импульс отдачи в противоположном направлении. Во-вторых, возникает поле, распространяющееся в обратном направлении, т.е. поле отражения. На схеме оно изображено красной стрелкой. Первый эффект был подтвержден экспериментально [3], второй остается пока теоретическим предсказанием.

Отметим, что это отражение отличается от обычного френелевского, при котором отраженная волна формируется в поверхностном слое, имеющем глубину порядка длины волны.

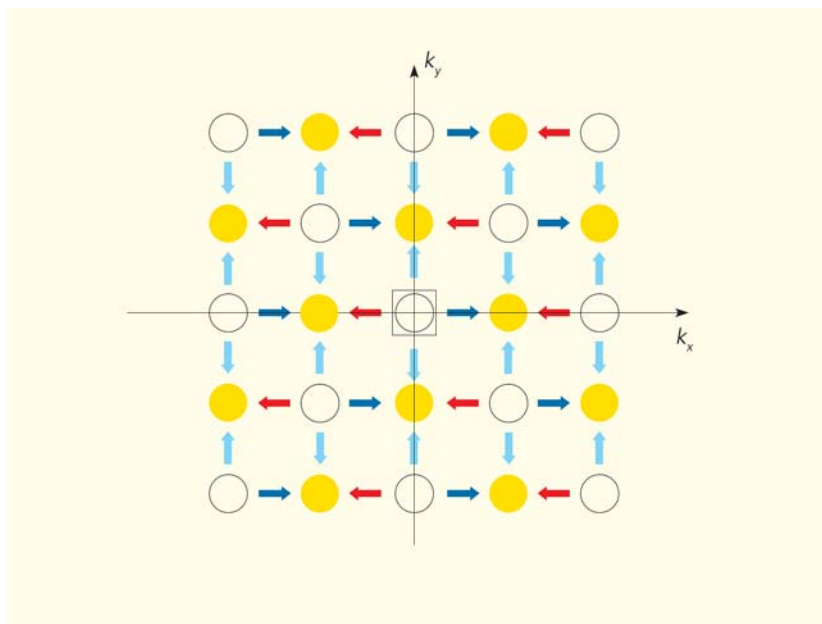


Рис.4. Фрагмент схемы переходов при учете многократных актов рассеяния. Обозначения такие же, как на рис.3.

В нашем случае отраженная волна формируется во всем объеме газа, т.е. это отражение носит объемный характер. Кроме того, так же, как это имеет место для рассеянной волны, его интенсивность должна быть пропорциональна квадрату числа атомов в системе. Поэтому такое отражение может быть названо сверхизлучательным.

На рис.4 показан ограниченный фрагмент схемы переходов. Его легко расширить, соблюдая следующие правила построения. Основные и возбужденные электронные состояния (белые и желтые кружки) располагаются в шахматной последовательности. Стрелки, изображающие моды поля, всегда направлены от белых кружков: вдоль вертикали — это моды рассеянного поля; вдоль горизонтали стрелка, направленная вправо (синего цвета), — мода лазерного пучка, а красная стрелка, направленная влево, изображает поле отражения.

Приведенная схема иллюстрирует лишь план теоретического рассмотрения. Какие же конкретные результаты удалось получить благодаря решению

системы уравнений Максвелла—Шрёдингера, о которой мы упоминали выше? Используя параметры, приведенные в экспериментальных работах, мы вычислили интенсивности рассеянных световых пучков и их динамику в течение действия возбуждающего импульса, построили их спектры. Для импульсов продолжительностью порядка долей миллисекунды в спектрах рассеянного света отчетливо виден сдвиг частоты в красную сторону на величину кинетической энергии (в единицах частоты), получаемой атомом в акте рассеяния фотона. Спектр отражения имеет еще больший сдвиг в красную сторону. Это вызвано тем, что отчасти отражение света связано также с актами возбуждения атомов светом, рассеянным вдоль оси конденсата, частота которого, как мы только что отмечали, меньше лазерной, и энергия этого ослабленного фотона расходуется еще на сообщение кинетической энергии атому. Мы описали также динамику образования атомных облаков и пространственное распределение концентрации атомов в этих об-

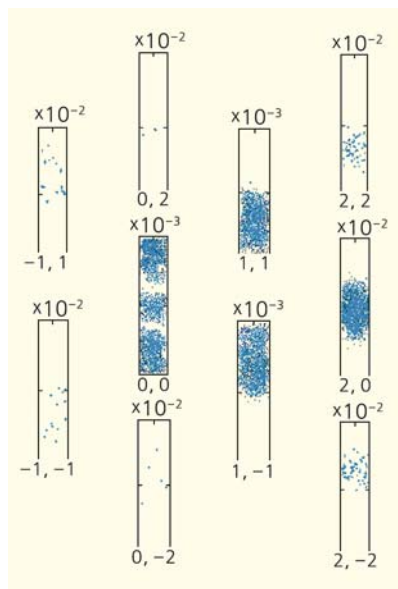


Рис.5. Результат теоретического расчета: распределение атомов в атомных облаках, движущихся с различными скоростями после рассеяния лазерного импульса на бозе-эйнштейновском конденсате. Распределения получены с помощью метода Монте-Карло, примененного к решению системы уравнений Максвелла—Шрёдингера. Эти облака и их положения соответствуют белым кружкам на рис.4. Два числа, подписанные под каждым облаком, определяют составляющие скорости. Коэффициенты, указанные сверху, показывают, во сколько раз уменьшено число атомов в каждом облаке. Полное число атомов, использованное в расчете, равно $2 \cdot 10^6$.

лаках. Пример такого распределения, показанный на рис.5, качественно хорошо согласуется с экспериментальной картиной, приведенной в статье [2].

Перед восходом солнца

Описанные выше эффекты имеют принципиально новый характер не только из-за уникальности объекта — БЭК, на котором происходит рассеяние света. Сам процесс рассеяния в данном случае тоже уникален. Хорошо известны такие типы рассеяния света, как рэлеевское и рассеяние Мандельштама—

Ландсберга (чаще называемое рамановским). Рассеяние Мандельштама—Ландсберга отличается от рэлеевского тем, что конечное состояние атома, испытавшего акт рассеяния, считается отличным от начального, и поэтому частота рассеянного света должна отличаться от частоты падающего. Строго говоря, при рэлеевском рассеянии частота рассеянного света тоже должна отличаться от частоты возбуждения из-за переданного атому импульса — она может оказаться больше или меньше в зависимости от того, произошло ли ускорение или замедление атома. Обычно разница частот достаточно мала по сравнению с шириной спектра возбуждения, и ею пренебрегают. Имеется еще один вид рассеяния — вынужденное. Это такой процесс, когда атом возбуждается нерезонансным светом с частотой ω_1 с уровня E_1 , а дополнительное излучение с частотой ω_2 переводит атом на уровень E_3 , такой, что $E_2 + \hbar\omega_2 = E_1 + \hbar\omega_1$. Упомяну-

тые типы рассеяния относятся к некогерентным: его интенсивность складывается из интенсивностей независимого рассеяния отдельными атомами. Напротив, повторим, в рассмотренном нами случае свериэлучательного рассеяния происходит сложение не интенсивностей, а напряженностей полей, и поэтому суммарная интенсивность рассеяния оказывается пропорциональной квадрату числа атомов в системе. Таким же свойством должно обладать и свериэлучательное отражение.

Какое практическое значение может иметь рассеяние света на БЭК? Исторический опыт показывает, что с ответом на такие вопросы не следует торопиться. Но уже сейчас очевидно, что рассеяние монохроматического света на БЭК дает возможность генерации когерентных атомных волн. Один из вариантов такой генерации, близкий к описанному эксперименту, был даже назван «атомным лазером» [2]. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 08-02-00502.

Литература

1. *Einstein A.* // Sitzungsher. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-math. Kl. 1925. S.3—14. (Эйнштейн А. Квантовая теория одноатомного идеального газа. Второе сообщение // Собрание научных трудов. Т.III. С.489—502. М., 1966.)
2. *Inouye S., Chikkatur A., Stamper-Kurn D. et al.* // Science. 1999. V.285. P.571—574.
3. *Scheneble D., Torii Y., Boyd M. et al.* // Science. 2003. V.300. P.475—478.
4. *Inouye S., Löw R., Gupta S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V.85. P.4225—4228.
5. *Бальжин В.А., Летохов В.С., Миногин В.Г.* // УФН. 1985. Т.147. №9. С.117—156.
6. *Чу С., Коэн-Таннуджи К., Филлипс В.* // УФН. 1999. Т.169. С. 271—322.
7. *Кеттерле В., Корнелл Э., Виман К.* // УФН. 2003. Т.175. С.1320—1358.
8. *Benedict M.G., Ermolaev A.M., Malyshev V.A., Sokolov I.V., Trifonov E.D.* Superradiance: Multiatomic Coherent Emission. Bristol; Philadelphia, 1996.
9. *Аветисян Ю.А., Трифонов Е.Д.* // ЖЭТФ. 2008. Т.133. С.495—504.
10. *Аветисян Ю.А., Трифонов Е.Д.* // Оптика и спектроскопия. 2008. Т.105. С.613—621.

Однополые ящерицы: экология и поведение

Э.А.Галоян

Явление партеногенеза (от греч. *παρθενος* — девственница и *γενεσις* — происхождение, возникновение) было обнаружено довольно давно. Девственный (т.е. без участия самцов) способ размножения весьма распространен у беспозвоночных животных, и открытие среди них новых видов, плодящихся подобным образом, уже не вызывает ни у кого удивления. Пчелы, тли, рачки, моллюски и множество иных беспозвоночных регулярно прибегают к этому пути увеличения численности популяции или вида в целом. Не станем вдаваться в подробную классификацию способов партеногенетического размножения, приводить разнообразные примеры и описывать однополые виды беспозвоночных животных — тому посвящены многочисленные обзоры, которые могут удовлетворить любопытство самого искушенного читателя (см. например, [1]). Наши же интересы связаны с изучением партеногенеза у позвоночных животных.

Хотя к середине XX в. уже были известны виды рыб, размножающихся без участия самцов, сенсацией для зоологов стало открытие в начале 1960-х годов партеногенеза у наземных позвоночных, рептилий. Партеногенетическими оказались некоторые виды (причем именно виды, а не отдельные популяции или особи) кавказских скальных ящериц рода *Lacerta* [2].



Эдуард Арташесович Галоян, аспирант биологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — биология, экология и поведение рептилий; в частности занимается изучением особенностей биологии партеногенетических ящериц и их сравнением с обоеполыми видами.

(Ныне эти виды выделены в отдельный род *Darevskia* в честь известного отечественного герпетолога Ильи Сергеевича Даревского, открывшего этот феномен.) Вскоре были найдены 15 однополых видов и в довольно хорошо изученном к тому времени роде ящериц-бегунов (*Cnemidophorus*) семейства Teiidae [3]. А годы спустя оказалось, что тем же способом плодятся геккон *Heteronotia binoei*, живущий в западной и центральной Австралии, и даже агамы-бабочки (*Leiolepis*), обитающие на морских побережьях Таиланда и Вьетнама [4, 5]. Недавно в девственном способе размножения заподозрили комодских варанов (*Varanus comodensis*): в лондонском зоопарке самка этого вида отложила вроде бы неоплодотворенное яйцо.

Безусловно, список всех партеногенетических форм рептилий пока не полон, однако уже

сейчас рассказами об однополых ящерицах можно удивить лишь людей, не искушенных в биологии. Для зоологов же этот феномен стал настолько обыденным и распространенным, что изначально вызванный им ажиотаж в значительной степени утих. Даже герпетологи, выяснив некоторые особенности жизни и происхождения подобных форм, стали уделять этому явлению гораздо меньше внимания. Между тем еще многое остается неизвестным, и в первую очередь в поведении и образе жизни таких ящериц.

Статья, посвященная разнообразию и происхождению партеногенетических видов ящериц, была опубликована в «Природе» почти 10 лет назад [6]. Попробуем теперь разобраться в том, что известно о биологии, экологии и поведении однополых видов ящериц и чем они отличаются от обычных видов.

Происхождение

Межвидовые гибриды, как известно, зачастую бесплодны, однако в некоторых случаях природа обходит существующие барьеры. В подобных ситуациях принято говорить о видообразовании в результате сетчатой эволюции. Яркий тому пример — партеногенетические ящерицы, большинство из которых, как показали исследования, возникли вследствие природного скрещивания (гибридизации) различных обоеполых видов и обладают промежуточными признаками, придающими им сходство с родительскими формами [2].

Гибрид развивается из зиготы, образующейся при слиянии яйцеклетки и сперматозоида, с наборами хромосом, которые достались ему от родителей разных видов. Нормальное мейотическое деление в этом случае затруднено, так как исключаются возможность сближения гомологичных хромосом и взаимный обмен их гомологичными участками (кроссинговер). Следовательно, гибрид либо остается стерильным, либо начинает размножаться партеногенетически. У «нормальных» ящериц половые клетки родителей содержат редуцированное (уменьшенное вдвое, или гаплоидное) число хромосом, которое при оплодотворении удваивается,

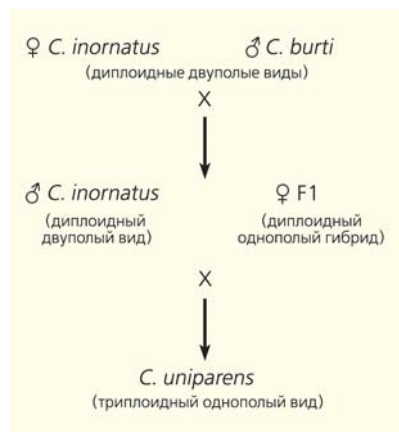


Схема образования однополых хлыстохвостой ящерицы [17].

и потомство развивается с двойным (диплоидным) набором. У партеногенетических видов оплодотворение отсутствует, набор хромосом яйцеклетки редуцирован, тем не менее потомство диплоидно (как у однополых хлыстохвостой ящерицы, *Cnemidophorus uniparens*) или триплоидно (как у американских ящериц-бегунов). Механизм восстановления набора хромосом у однополых скальных ящериц пока изучен недостаточно, но ясно, что происходит это в результате сложных цитогенетических процессов внутри самой яйцеклетки. У партеногенетических ящериц-бегунов такой механизм обеспечивается премейотическим эндомитозом, во время которого число хромосом удваивается, что обуславливает наличие гомологичных хромосом, необходимых для нормального протекания мейоза. У этих ящериц все партеногенетические виды не диплоидны, а триплоидны, так как происходят от скрещивания гибрида с одной из родительских форм. В случае со скальными ящерицами подобные особи становятся бесплодными и в дальнейшем умирают, так и не размножившись.

В результате анализа хромосом партеногенетических форм удалось доказать, что они имеют гибридное происхождение. Оказалось, что двойной набор хромосом однополых видов соответствует хромосомам двух бисексуальных видов, которые и должны быть предковыми формами [2, 8]. Развитие молекулярно-генетических методов в 1990—2000-х годах позволило точнее выявить родителей большинства известных сегодня партеногенетических форм. Между тем некоторые из них могли спонтанно возникнуть внутри отдельных обоеполых видов [9]. Похоже, что предрасположенность к подобному размножению существует у различных ящериц, но закрепиться в популяции, состоящей из особей обоих полов, этому явлению

довольно сложно. Не исключено, что в таких популяциях бывают случаи партеногенетического размножения отдельных особей, во всяком случае подобный феномен часто встречается у насекомых [1]. Тем не менее ни к каким эволюционным достижениям и формированию новых видов это в большинстве случаев не приводит.

Каковы причины появления партеногенетических видов и почему они способны противостоять бисексуальным, зачастую достигая большего биологического прогресса? Обычно появление однополых видов связывают с ухудшением окружающих условий. По мнению Даревского, ключевую роль в становлении партеногенетических видов сыграли оледенения [2]. В период последнего из них (10 тыс. лет назад) в Кавказских горах сложились суровые условия с длинной холодной зимой и коротким летом. Благодаря тому, что партеногенетические виды размножаются быстрее (популяции состоят только из самок, способных откладывать яйца), и несмотря на скромную выживаемость молодняка во время зимовки (большинство ящериц гибнет в первый год жизни [10]), кто-то все-таки выживает. Кроме того, не тратится время на поиск полового партнера, следовательно, самки могут раньше отложить яйца, что позволяет детенышам лучше подготовиться к зимовке.

Появление партеногенетических ящериц рода *Cnemidophorus* также связывают с ухудшением экологических условий [8]. Гипотеза, предложенная для объяснения появления партеногенетических форм ящериц-бегунов, носит название теории «сорных» видов. Дело в том, что подобные виды животных формировались в нестабильных субоптимальных местообитаниях, образовавшихся после вырубке леса, на пожарищах, заросших песчаных пляжах. Таким образом, однополые виды, способные размножаться гораз-

до быстрее обоеполых сородичей, подобно сорнякам занимают эти нестабильные участки [8]. Даревский считает, что партеногенетические скальные ящерицы, появившиеся в эпоху оледенения таким образом, могли быстро завоевать те пространства, которые освободились от ледника в горах Армении около 10 тыс. лет назад [10].

Генетические отличия от родителей

Партеногенетические виды часто называют клональными, ведь одной единственной самки достаточно, чтобы возник вид, где каждая особь — клон прародительницы. За последние полтора десятка лет возрос интерес ученых к изменчивости этих видов. Прделано много работы с применением молекулярно-генетических методов, позволивших определить генетическое внутривидовое разнообразие. В некоторых случаях, например у белобрюхой ящерицы (*Darevskia unisexualis*), действительно наблюдается клональное однообразие, однако существует масса других примеров, когда внутри партеногенетического вида обнаружено генетическое разнообразие особей [6, 11]. Подобные результаты объясняются отсутствием у клональных форм комбинативной изменчивости и ограниченной потенцией к мутациям. Следует отметить, что внешне самки большинства однополых видов ящериц действительно выглядят очень похоже. Тем не менее существуют и исключения, например, различные популяции армянской ящерицы (*D.armeniaca*) значительно отличаются друг от друга. Даже в пределах одной популяции заметны существенные отличия в окраске, размере и комплекции разных особей. Этому можно попытаться найти несколько объяснений. Возможно, образование некоторых партеногенетических видов происходило не единожды, и в этом слу-



Партеногенетические виды скальных ящериц — белобрюхая (вверху) и армянская ящерицы.

Здесь и далее фото автора

чае различные популяции должны отличаться друг от друга. С другой стороны, нельзя полностью исключать мутационную изменчивость. Некоторую роль в данном случае могут иг-

рать и самцы, изредка появляющиеся в партеногенетических популяциях [2]. Точные причины до сих пор не известны, и выяснить это еще только предстоит.

Особенности экологии

Часто партеногенетические виды обитают в одних и тех же ландшафтах, что и бисексуальные родительские формы [12]. Не удалось обнаружить никаких принципиальных отличий и в их пищевых предпочтениях [10]. Замечено, что партеногенетические скальные ящерицы лучше приспособлены к более суровым условиям и обитают высоко в горах, в местах с холодной зимой и коротким летом. Плотность популяций таких видов (независимо, сосуществуют они с бисексуальными формами или нет) обычно на порядок выше, чем в популяциях обоеполюх близких видов скальных ящериц. В некоторых случаях численность особей однополюх видов столь велика, что может достигать десятков и даже сотен особей на несколько квадратных метров [10, 13, 14]. Зачастую плотность населения ящериц ограничивается наличием не пищи, как это бывает у млекопитающих и птиц, а убежищ и мест, где можно погреться. По ряду причин, о которых мы расскажем чуть позже, социальная организация партеногенетических видов ящериц устроена так, что позволяет сосуществовать большому числу жи-

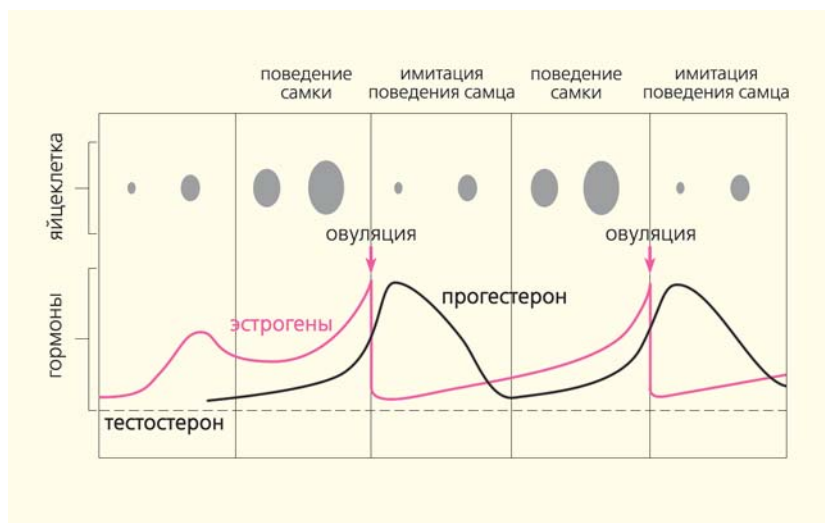
вотных (для обоеполюх видов это совершенно невозможно). Множество самок однополюх ящериц Даля (*D.dabli*) различного возраста собираются вместе в одних убежищах, в то время как «нормальные» ящерицы образуют подобные скопления только во время зимовок, а летом ночуют поодиночке либо по две-три особи вместе (обычно самец и одна-две самки) [14].

Половое поведение

Обоеполюм позвоночным животным для размножения необходима встреча партнеров, характеризующаяся видоспецифичным половым поведением, в финале которого совершается копуляция и оплодотворение. Партеногенетическим особям, казалось бы, для продолжения рода подобные встречи ни к чему. Тем не менее у особей некоторых клональных видов рода *Cnemidophorus* в лабораторных условиях было замечено поведение, которое нельзя было трактовать иначе, как половое: одна ящерица держала другую челюстями, «жевала» и заводила клоаку под брюхо партнеру, после чего клоаки обоих животных контактировали. Таким образом, однополюе самки *C.uniparens* имити-

ровали поведение самцов родительских видов, чего никогда не случается с обычными самками. Отличие заключалось лишь в том, что у самок нет морфологически выраженных мужских половых органов (гемипенисов), поэтому копуляции не происходило. Подобное поведение было названо псевдокопуляционным, так как, в отличие от нормальной копуляции, не заканчивалось коитусом [15]. Можно ли считать подобное поведение рудиментарным или оно необходимо для успешного воспроизведения? Хорошо известно, что в процессе ухаживания партнеры физиологически подготавливают друг друга к спариванию, что должно в дальнейшем отразиться на успехе копуляции и плодовитости. Действительно: содержащиеся по отдельности самки партеногенетических видов откладывали гораздо меньше яиц, чем те, которые жили вместе [16].

Дальнейшие исследования показали, что у каждой самки *C.uniparens* чередуются периоды, когда она ведет себя как самка или как самец. До овуляции она остается сама собой, а после попадания яиц в воронку яйцевода ее поведение резко меняется — она становится функционально самцом, который начинает проявлять знаки внимания по отношению к остальным особям, но только до тех пор, пока не отложены яйца [16]. Причина изменения поведения самки кроется в изменении ее гормонального фона. У самцов половое поведение в норме запускается при возрастании концентрации мужских половых гормонов (андрогенов). Даже если удалить самцу семенники, но ввести андрогены, он будет проявлять половое поведение. У партеногенетических самок имитация поведения самца связана с изменением концентрации женских половых гормонов (эстрогенов и прогестерона). Уровень тестостерона (основного андрогена) в крови партеногенетичес-



Зависимость поведения от концентрации гормонов в крови ящериц [16]. Пояснения в тексте.

ких самок, в отличие от самцов, у которых он повышается в сезон размножения, стабилен. А концентрации эстрогенов и прогестерона заметно меняются. До овуляции в крови преобладают эстрогены. По мере созревания яйцеклеток уровни эстрогенов и прогестерона возрастают и в какой-то момент уравниваются. Наступает овуляция, и концентрация эстрогенов резко падает. В период, когда в крови преобладает прогестерон, ящерица ведет себя как самец и вновь становится самкой только после того, как уровень прогестерона постепенно снизится и станет ниже концентрации эстрогенов. Позднее выяснилось, что прогестерон провоцирует половое поведение у кастрированных самцов. Интересно, что самки обоеполовых видов совершенно нечувствительны к андрогенам, чего не скажешь о партеногенетических, у которых есть рецепторы к мужским половым гормонам, хотя способ их продуцирования отсутствует [17].

Бисексуальным самкам половатой хлыстохвостой ящерицы (*C.inornatus*), которые вместе с самцами техасской пятнистой (*C.burti*) стали родительскими видами для однополой хлыстохвостой ящерицы (*C.uniparens*), присутствие самцов необходимо для нормальной овуляции. Если таких самок содержать поодиночке, то овуляции не происходит, если вместе с кастрированными самцами, которым искусственно ввели мужские гормоны, то практически все самки откладывают яйца, хотя и не оплодотворенные. Аналогичная ситуация складывается с партеногенетическими самками: при одиночном содержании откладывают яйца немногие, если же подселить к самке другую самку, которая проявляет псевдокопуляционное поведение, то увеличивается и число кладок в сезон размножения. Имитируя копуляцию с другими самками, псевдосамцы стимулируют овуляцию у остальных особей попу-

ляции, что приводит к каскадной реакции, в результате которой количество самок с созревающими яйцами возрастает в геометрической прогрессии. Это означает, что подобное поведение позволяет всем особям популяции как можно быстрее и приблизительно в одно и то же время отложить яйца, что способствует их одновременному и сравнительно раннему созреванию. В таком случае псевдокопуляционное поведение играет важную роль в жизнеспособности популяции.

Социосексуальные системы

Понятно, что жизнь животного в данных условиях во многом определяется экологическими факторами — наличием корма, убежищ, где можно укрыться от врагов, мест, где можно греться (когда речь идет о холоднокровных) и т.д. Именно условия окружающей среды зачастую ограничивают численность популяции, однако ее пространственная структура и характер использования индивидуального участка в большей степени зависят от взаимоотношений между особями, половыми и возрастными когортами. Эти так называемые социосексуальные взаимоотношения влияют на образ жизни половозрелых особей в период размножения. В зависимости от количества половых партнеров, способа их приобретения, особенностей парных связей и вклада каждого партнера в заботу о потомстве выделяют четыре типа социосексуальных систем: промискуитет, полигиния, полиандрия и моногамия.

Наиболее примитивной формой взаимоотношений полов считается промискуитет — неупорядоченные половые связи, когда партнеры не имеют никаких особых предпочтений. Индивидуальные участки таких особей весьма велики, а их встречи случайны и приурочены к сезону размножения.

В случае полигамии в период размножения характер использования индивидуального пространства совершенно иной: у полигамных ящериц наиболее успешные и удачливые самцы получают доступ к большинству самок, которых они охраняют от других самцов. Вокруг самки сосредоточивается вся жизнь самца. Структура его индивидуального участка в этом случае зависит от количества самок и их образа жизни, что, в свою очередь, в большей степени определяется внешними факторами. Таким образом, получается цепочка зависимостей: экологические условия → поведение самок → поведение самцов.

Моногамные отношения — наиболее продвинутая стадия взаимоотношения полов, при которой возникает не только сексуальная, но и социальная привязанность двух особей противоположного пола, когда отношения между ними продолжают до и после сезона размножения. И хотя для ящериц подобный тип взаимоотношения не характерен, встречаются яркие исключения — например, у австралийских сцинков рода *Egernia*.

У партеногенетических видов нет самцов, соответственно нет и социосексуальных взаимоотношений, что должно упрощать этологическую структуру популяции. Это означает, что взаимодействия между особями должны быть простыми, а пространственная структура популяции, характер использования индивидуального участка и бюджет времени определяются у однополовых видов в большей степени, чем у обоеполовых, внешними факторами среды. Если это действительно так, то однополые ящерицы — хороший модельный объект для изучения влияния экологических факторов на различные популяционные характеристики. Однако наличие рудиментов полового поведения у некоторых партеногенетических видов заставляет усомниться в простоте взаимоотношений этих ящериц.

Социальное поведение

Работ, посвященных социальному поведению партеногенетических видов (причем не только ящериц), почти не существует. Большая часть исследований американских ящериц-бегунов, у которых обнаружено псевдополовое поведение и выяснены физиологические причины этого феномена, проведена в лабораториях. Об их взаимоотношениях в природе и использовании пространства практически ничего неизвестно. Ящерицы этого рода обитают в различных биотопах (в лесах и горах Северной Америки) и распространены с самого юга до севера континента. Все они — ярко выраженные энтомофаги. Фактически род *Cnemidophorus* в Америке играет роль семейства настоящих ящериц (*Lacertidae*) в Европе.

В немногочисленных работах по экологии партеногенетических видов ящериц сообщается, что у них нет каких-то особенных пищевых предпочтений, однако они много времени тратят на поиски пищи, в то время как обоеполые особи

больше заняты «выяснением отношений» с сородичами. Сведения о пространственно-этологической структуре популяции накоплены для нескольких видов обоеполых скальных ящериц. Наиболее полные данные собраны об ящерице Браунера (*D.brauneri*), обитающей на Черноморском побережье Кавказа, под Новороссийском. Оказалось, социум этих ящериц организован весьма сложно. В популяции сосуществуют две категории самцов — территориальные резиденты, проявляющие агрессивное поведение, и самцы, не имеющие своей территории. В зависимости от статуса у них по-разному строятся отношения с остальными особями. Агрессивные территориальные самцы постоянно гоняют «оппортунистов», поэтому те ведут скрытный образ жизни, редко вступают в контакты с самками и всегда в этом случае стараются избежать встречи с «хозяином». Взаимоотношения таких самцов с самками обычно носят агрессивно-сексуальный характер, тем не менее им редко удается удачно спариться с самкой [18].

Территориальные самцы скальной ящерицы обладают индивидуальными участками с хорошо выраженной структурой, основой которой служит зона интенсивного использования, где самец проводит большую часть времени и в которой сосредоточены излюбленные убежища, укрытия, зоны для обогрева и контакта с самками. Здесь же самец кормится. Зона интенсивного использования совпадает с территорией, которую самец контролирует, совершая регулярные патрульные маршруты. Территориальные самцы относятся друг к другу с большим пиететом, чем к «неимущим» самцам. Границы территории соседей четко очерчены, хотя в некоторых случаях один из них может попытаться оспорить расположение границ. В этом случае на спорном участке происходят ритуальные бои, в результате которых границы могут быть отодвинуты в пользу победителя [19].

На участке самца могут обитать одна или несколько самок, с которыми он поддерживает регулярные контакты [20]. Самки не имеют территории и свободно перемещаются, выбирая благоприятные места. Структура индивидуального участка самца определяется пространственным размещением самок [18]. Интересно, что в оптимальных условиях обнаруживается склонность к социальной моногамии. Длительные отношения самца с отдельными самками, которые распространяются за пределы сезона размножения, приводят к тому, что некоторые особи образуют пары: они проводят много времени друг с другом, греясь на солнце, используют одни и те же убежища. Подобные отношения формируются в течение нескольких лет и продолжают существовать с участка одного из партнеров [20]. В субоптимальных условиях количество убежищ и пищи ограничено, что приводит к увеличению размера индивидуального участка самца



Ящерица Браунера.



Куринская ящерица.

и к снижению уровня контроля над ним, возрастанию времени на патрулирование и частично-му разрушению структуры участка [21]. В результате самцы не образуют устойчивых пар с самками, межполовые контакты становятся более редкими, хаотичными и случайными и продолжаются только в период размножения [21].

Самки скальных ящериц редко проявляют агрессивное поведение по отношению друг к другу. Часто они ночуют в одних и тех же убежищах и используют общие места для обогрева. Отношения различных самок чрезвычайно индивидуальны и определяются их личными

предпочтениями. В некоторых случаях самки, обитающие в пределах участка одного самца, относятся друг к другу нетерпимо и устраивают драки, напоминающие пограничные ритуальные бои самцов: подолгу ходят друг вокруг друга, раздувают горло, становятся боком друг к другу и уплощают тело.

Наблюдая за их поведением, понимаешь, что они хорошо распознают друг друга с помощью зрения и обоняния. Как известно, настоящие ящерицы способны узнавать друг друга по запаху и даже отличают своих братьев и сестер от чужих особей [22]. Скальные ящерицы — не исключение. Например, уста-

новлено, что самцы по-разному относятся к своим соседям, в связи с чем даже был выявлен феномен, названный «dear enemy phenomenon»: владелец территории распознает соседнего территориального резидента и относится к нему более миролюбиво, чем к прочим, даже если тот проник на его территорию. Самец может узнать ящерицу, не встречая ее больше года [18]. Таким образом, в социальных взаимодействиях немаловажную роль играет индивидуальное опознавание. Исходя из того, что партеногенетические ящерицы образуют невероятные по плотности скопления, уровень социальности у них го-

раздо выше, чем у обоеполюх родственных форм.

А.Г.Трофимов исследовал пространственно-этологическую структуру популяций партеногенетических скальных ящериц Даля и армянских ящериц, обитающих отдельно (аллопатрия) и вместе (симпатрия) с обоеполой куриной ящерицей (*D.portschinskii*). Замечено, что ящерицы используют совместные убежища, в которых проводят ночь. Состав в таких убежищах более или менее постоянен. Агрессивные контакты чрезвычайно редки, и никакой иерархии выявлено не было. Практически все самки безразлично относятся друг к другу. В симпатрических популяциях самки партеногенетической ящерицы Даля иногда спариваются с самцами куриной ящерицы, что, вероятно, можно считать эпифеноменом повышен-

ного возбуждения самцов в период размножения, поскольку обычно они хорошо отличают своих самок от партеногенетических [14]. Социальная организация и плотность популяции партеногенетических армянских ящериц в большей степени, чем у обоеполюх видов, определяются внешними условиями. Эти миролюбивые ящерицы собираются в немногочисленных благоприятных стациях, совместно используют убежища, где локальная плотность может быть весьма высокой. Если же условия позволяют и убежищ достаточно, то ящерицы не образуют скоплений, а распределены более равномерно.

Похоже, что повышенная численность в популяциях партеногенетических ящериц объясняется не столько удвоенными темпами размножения, а их спокойным нравом и добрым отно-

шением с сородичами. У обоеполюх видов «правят бал» (пространственно-этологической структурой популяции) самцы, обладающие территориями. Самки же много времени тратят на выяснение отношений с противоположным полом, а иногда и между собой. Исход таких (интрасексуальных) контактов может быть разным: одни животные постоянно конфликтуют, другие относятся друг к другу миролюбиво. У однополюх видов встречи самок с особями своего вида — некоторый аналог поведения самок обоеполюх видов, однако отсутствие самцов приводит к совершенно иному типу пространственно-этологической структуры популяции. Выяснение особенностей взаимоотношений партеногенетических самок — чрезвычайно интересная и интригующая задача, в которой еще много неясного. ■

Литература

1. Гребельный С.Д. // Журн. зоологии беспозвоночных. 2005. Т.2. Вып.1. С.79—102.
2. Даревский И.С. // Зоол. журн. 1962. Т.18. Вып.3. С.397—408.
3. Maslin T.P. // Science. 1962. V.135. №3499. P.212—213.
4. Moritz C. // Genetics. 1991. V.129. P.211—219.
5. Darevskiya I.S., Kupriyanova L.A. // Herpetozoa. 1993. №6. P.3—20.
6. Даревский И.С., Гречко В.В., Куприянова Л.А. Ящерицы, размножающиеся без самцов // Природа. 2000. №9. С.61—68.
7. Cuellar O. // J. of Morphology. 1971. V.133. №2. P.139—65.
8. Lowe C.H., Wright J.W. // J. Arizona Acad. Sci. 1966. №4. P.81—87.
9. Peccinini-Scale D., Frota-Pessoa O. // Chromosoma. 1974. V.47. №4.
10. Даревский И.С. Скальные ящерицы Кавказа. Л., 1967.
11. Murphy R.W., Darevsky I.S., MacCulloch R.D. et al. // J.Genetica. 1997. V. 101. №2. P.125—130.
12. Cuellar O. // Amer. Zool. 1979. №19. P.773—786.
13. Даниелян Ф.Д. // Зоол. журн. 1971. Т.10. Вып.1. С.145—147.
14. Трофимов А.Г. Пространственная структура популяций некоторых партеногенетических и двуполох скальных ящериц Кавказа. Диссертация на соискание ученой степени к.б.н. Киев, 1981.
15. Crews D., Fitzgerald K. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1980 V.77. №1. P.499—502.
16. Crews D. // Scientific American. 1987. №257. 116—121.
17. Woolley S.C., Sakata J.T., Crews D. // ILAR Journal. 2004. V.45. №1. P.46—53.
18. Целлариус А.Ю., Целлариус Е.Ю. // Зоол. журн. 2005. Т.84. №9. С.1123—1135.
19. Целлариус А.Ю., Целлариус Е.Ю. // Зоол. журн. 2006. Т.86. №1. С.73—83.
20. Целлариус Е.Ю. Возможность длительного общения с самкой как основной фактор формирования территории у самцов скальной ящерицы (*Lacerta saxicola*) // Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых. М., 2006. С.201—206.
21. Галоян Э.А., Целлариус Е.Ю. Структура индивидуального участка и особенности поведения самцов скальной ящерицы в щебнистой дубраве хребта Навагир // Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых ИПЭЭ РАН. М., 2006. С.92—99.
22. LeAna J.P., Fraipont M.de // Behav. Ecol. Sociobiol. 1998. №42. P.341—347.

Геометрия помогает геологии

К 250-летию Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН

Е.Г. Мирлин

Тропинки геологической науки

Старейшему музею Москвы — Государственному геологическому музею им. В.И. Вернадского Российской академии наук — в этом году исполняется 250 лет. В нашей стране старше его только Кунсткамера в Петербурге. Разумеется, тот факт, что один из самых старых музеев страны — геологический, неслучаен. Именно геологам принадлежит заслуга в выявлении и изучении несметных минерально-сырьевых богатств России, которые всегда были и продолжают оставаться основой экономического могущества нашей страны.

Началу коллекций музея положил дар Московскому университету, сделанный в 1755 г. семьей уральских заводчиков Демидовых. Это был Минеральный кабинет, купленный в Германии. В 1759 г. он выставлялся для всеобщего обозрения в одном из зданий Императорского Московского университета, находившегося на месте современного Исторического музея, на Красной площади.

Как следует из названия, состоял Кабинет из коллекции минералов. Вообще XVIII в. отмечен всплеском интереса к различным камням — коллекционированием минералов-самоцветов занимались многие аристократические фамилии как за



Евгений Гилельевич Мирлин, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН. Область научных интересов — морская геология и геофизика, геодинамика. Неоднократно публиковался в «Природе».

рубежом, так и в России. Люди, вероятно, даже не столько понимали, сколько интуитивно чувствовали, что красивые камни — не только источник сильных положительных эмоциональных переживаний, но и заключают в себе чрезвычайно ценную и обширную научную информацию. Сам факт того, что демидовская коллекция минералов была передана в распоряжение ученых, убедительное тому свидетельство.

Прошли годы, десятилетия, столетия... И именно исследование физических и химических свойств горных пород и минералов создало основу для становления и развития самостоятельных наук и научных дисциплин, которые в совокупности составляют современный комплекс наук о Земле. К примеру, изучение физических свойств горных пород положило начало геофизике и входящим в нее сейсмологии,

палеомагнетизму, геотермике, петрофизике и др. Исследование химического состава горных пород и минералов лежит в основе геохимии, окаменевшие отпечатки организмов геологического прошлого служат предметом изучения палеонтологии, а горные породы морей и океанов изучает морская геология. Другими словами, от образца минерала, горной породы, каменного отпечатка древнего организма начинается научная тропинка, ведущая к важнейшим фундаментальным научным проблемам развития нашей планеты.

Нынешние коллекции Государственного геологического музея (ГГМ) включают в себя более 260 тыс. образцов. Конечно, пройти по всем научным тропинкам, которые ведут свое начало от геологических коллекций из фондов музея, невозможно. Мы предлагаем читателю совершить краткое путешествие



Рис.1. Базальтовые лавы (из фонда ГГМ). *а* — подушечная лава, образовавшаяся при подводном излиянии. Видна стекловатая корка закаливания, возникшая при соприкосновении лавы с водой. Размер образца — 25×19×16 см (гребень Срединно-Атлантического хребта). *б* — базальтовая канатная лава (разновидность АА-лавы). Размер 23×12×10 см (Канарский архипелаг, вулкан Тейде).

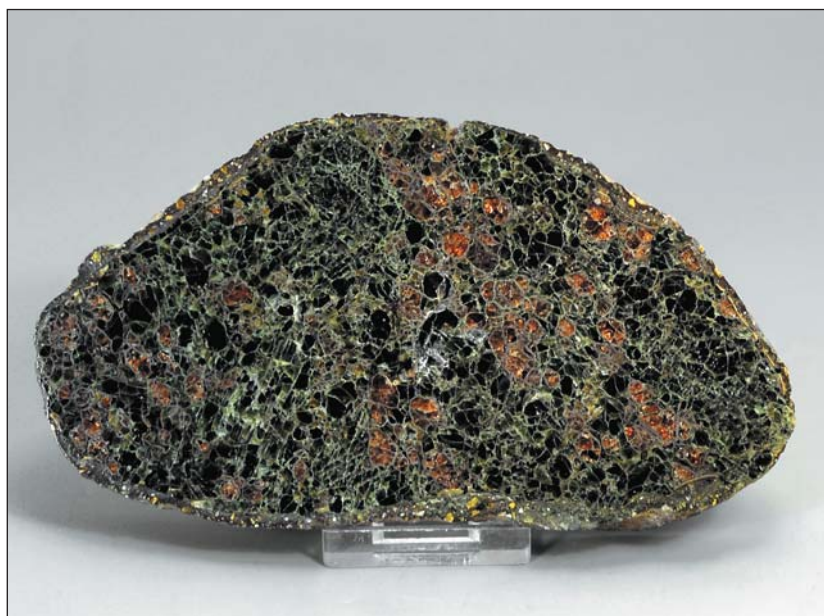


Рис.2. Включение глубинной породы (пироксенита) в базальте (из фонда ГГМ). Размер образца — 14×8×2 см (Витимское плато).

по одной лишь из них. Она также начинается с рассмотрения некоторых геологических образцов и ведет к одной из наиболее актуальных проблем современной геодинамики — проблеме внутриплитного магматизма и мантийных плюмов. Я искренне признателен главному хранителю музея М.Н.Кандинову за подбор образцов из фондов и полезные консультации в этом путешествии.

В основе современной геодинамики лежит представление о движении плит литосферы. При их раздвиге образуются океаны, при сближении и столкновении — формируются горные складчатые сооружения. Но если процессы, происходящие на границах плит, вполне удовлетворительно объясняются их движением и взаимодействием, то

объяснение разнообразных внутриплитных процессов в рамках этой концепции встречает весьма серьезные трудности. Это в полной мере относится к природе внутриплитных магматических очагов и, соответственно, структур земной коры, чья природа обусловлена внутриплитным магматизмом. Геологические объекты такого рода чрезвычайно разнятся по масштабу: от единичных изолированных вулканических гор на дне Мирового океана до гигантских площадей, занятых изверженными горными породами. Наиболее крупные из них — огромные по территории базальтовые провинции в Северной Атлантике и прилегающих регионах континентов, в Восточной Сибири и в Северо-Восточной Африке, на западе Индостана и в других регионах мира. Если базальтовая лава изливается в подводных условиях, образуются так называемые подушечные лавы (рис.1,*а*), а базальты континентов весьма похожи на сплетенные канаты, отчего и получили название канатных лав (рис.1,*б*). Толщи базальтов формируют платообразные возвышенности. Многие специалисты в области геодинамики полагают, что возникновение таких провинций платобазальтов есть результат воздействия на литосферу восходящих с больших глубин субвертикальных, относительно узких потоков горячего расплавленного глубинного вещества — мантийных плюмов. Последние, поднимаясь с больших глубин, словно прожигают литосферу, что приводит к формированию и обширных базальтовых провинций на континентах, и некоторых вулканических хребтов и островов в океане (Исландия, Гавайи и др.). Методом сейсмической томографии иногда удается зафиксировать мантийные части таких потоков, а в составе излившихся на поверхность пород обнаруживаются включения глубинного вещества (рис.2). Но как и почему возникают эти потоки? Существуют разные подходы

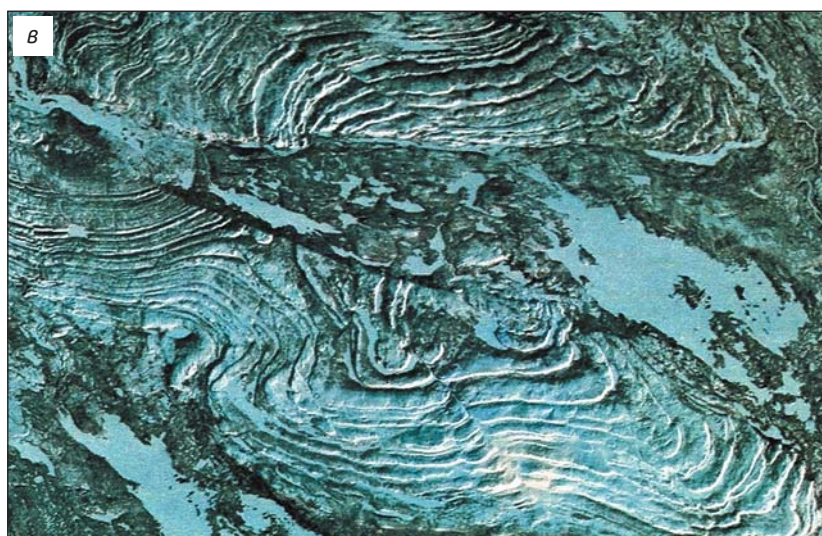


Рис.3. Масштабное самоподобие складок в осадочных горных породах. *а* — шлифованный образец, показывающий микроскладчатость в конгломерате. Размер 12×15 см (ущелье Чабаранг, Памир). *б* — геологическое обнажение вдоль дороги в Калифорнии. Длина 100 м, высота 20 м [1]. *в* — космический снимок складчатого пояса Лабрадор к северу от Квебека (Канада). Размер в поперечнике — несколько сот километров [2].



Рис.5. Геометрически подобные формы. а — метеоритные кратеры на поверхности Луны (снимок НАСА). б — отпечатки капель дождя на глине (образец из фонда ГГМ).

Рис.4. Геометрически подобные формы. а — дендрит железистых минералов по трещинам в глинистом известняке (из фонда ГГМ). Размер 24×19×1 см (Крым). б — отпечаток папоротникового растения *Odontopteris* sp. в алевролите (из фонда ГГМ). Размер 16×15×2 см (Донбасс).

к решению данной проблемы. Мы взглянем на нее, оттолкнувшись от геометрии природных объектов в том виде, как она запечатлена в образцах горных пород и в форме геологических структур, и от той информации, которую можно извлечь из этой геометрии.

Начало научной тропинки: какую природную среду изучают геологи?

Казалось бы, ответ на данный вопрос очевиден: это каменная «скорлупа» Земли — литосфера. Она, в отличие от других внешних оболочек (воздушной и водной), — твердая и относительно хрупкая. Упомянутая выше тектоника литосферных плит вроде бы это подтвердила. В основе ее лежит простое геометрическое наблюдение — сходство очертаний континентов, окружающих Атлантический океан. Когда-то они составляли единое целое, а затем раскололись (отдельный вопрос — причина

этого раскола) и раздвинулись, сохранив в первом приближении первоначальные очертания. При таком подходе подразумевается, что геологи имеют дело с природной средой (назовем ее «геосредой»), которая обладает однородностью, непрерывностью и линейностью физических характеристик и происходящих в ней процессов и которая механически дробится на осколки разных размеров. При этом задача геологов-тектонистов, условно говоря, состоит в том, чтобы собрать их воедино и восстановить прежнюю конфигурацию континентов и океанов, а также изучить историю их развития. Другими словами, геологи, занимающиеся проблемами глобальной тектоники, напоминают детей, увлеченно собирающих мозаичную картинку, состоящую из отдельных фрагментов.

Однако в последние два-три десятилетия эти традиционные представления о свойствах геосреды претерпевают существенные изменения. И немалую роль в таком пересмотре ее свойств играют наблюдения за структурной геометрией самых разнообразных геологических объектов, в том числе и отдельных геологических образцов.

Отметим, что описание геометрических форм природных геологических объектов — одно из классических направлений геологии. Неслучайно в основу многих терминов положены геометрические характеристики: островная *дуга*, простая и опрокинутая *складка*, *кольцевая* структура, *линеамент* (структура, имеющая прямолинейную или дуговую форму) и др. Важнейшая геологическая дисциплина — структурная геология — посвящена изучению деформации слоев осадочных пород, т.е. изменения их формы под воздействием различных процессов, протекающих во внутренних оболочках нашей планеты. Но это классическое направление стало наполняться новым содержанием по мере того, как в геологию стали вво-

дятся новые для нее научные понятия: система открытая, неравновесная, нелинейная; энтропия; диссипативная структура и, наконец, структура с фрактальной геометрией.

Для того, чтобы пояснить, в чем состоит суть такой природной формы, просим Вас, уважаемый читатель, взглянуть на рис.3. На нем показаны весьма часто встречающиеся формы залегания осадочных горных пород — складки. На одной из фотографий представлен образец из фондов нашего музея, показывающий микроскладчатость в горной породе, а на двух других — складки, в которые смяты породы в пределах крупных горных сооружений. Можете ли вы, не читая подпись к рисунку, определить, хотя бы приблизительно, масштаб каждой из фотографий, т.е. размер запечатленных на них складок? Наверняка нет. В этом нет ничего удивительного, ибо складки в осадочных породах — это типичный пример масштабно-инвариантных структурных природных образований — таких, в которых одна и та же форма проявляется при рассмотрении в различных масштабах. Гигантские складки с амплитудой в сотни и тысячи метров состоят из более мелких, а те, в свою очередь, из еще более мелких, и так вплоть до микроуровня.

Другой пример относится к дендритам — древовидным кристаллическим агрегатам, состоящим из отдельных сросшихся друг с другом кристаллов. Образуются они чаще всего в результате кристаллизации по тонким трещинам в горной породе и внешне практически неотличимы от каменных отпечатков древних растений. На рис.4 представлены фотографии двух образцов из фондов нашего музея. На одной запечатлен образец дендрита, на другой — отпечаток растения. Как и в первом случае, не читая подпись к рисунку, практически невозможно определить, к какому образцу относится каждая фотография.

Если пристальнее взглянуть на оба снимка, то можно увидеть, что геометрия отдельной веточки дендрита и веточки растения очень схожа. Геометрически подобные формы образуются при самых различных процессах. Падение метеоритов на поверхность крупного небесного тела приводит к формированию кратеров (рис.5,а). Однако и падение капель дождя на землю вызывает образование крохотных воронок, чрезвычайно сходных по форме с метеоритными кратерами (рис.5,б).

Такого рода природные объекты, обладающие геометрическим самоподобием, и носят название фрактальных. Основоположник учения о фрактальной геометрии природы, американский исследователь Б.Мандельброт определил фрактал как объект, состоящий из частей, в какой-то мере подобных целому [3]. Фрактальные объекты универсальны, ибо свойственны как живой, так и неживой природе, в чем мы могли убедиться, сравнивая фотографии образцов дендрита и растения. В последние два десятилетия число геологических объектов, попадающих под определение фрактально организованных, неуклонно растет. Круг явлений и структур в литосфере, которым свойствен феномен самоподобия, настолько широк, что охватить его в одной статье невозможно. Мы ограничимся рассмотрением наиболее наглядных примеров, относящихся к различным обстановкам в литосфере.

Одна из весьма распространенных геотектонических форм — структурные депрессии разного масштаба, образовавшиеся в результате сочетания раздвига и сдвига. В англоязычной геологической литературе они обозначаются как pull-apart (в буквальном переводе — тяни в стороны), а в отечественной этот термин обычно не переводится, и подобные депрессии называются так, как они звучат по-английски — пулл-апарт. Их отличительная черта — специ-

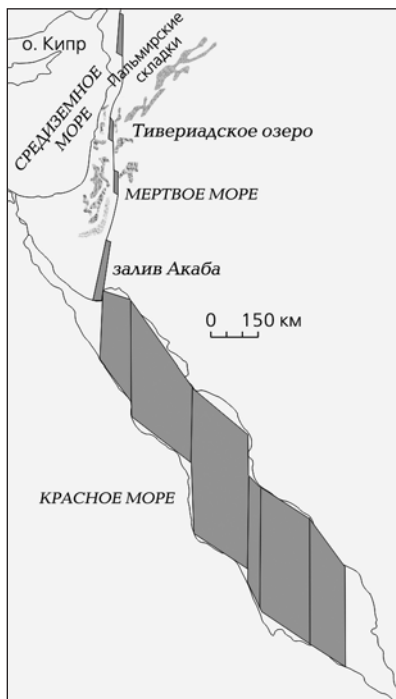


Рис.6. Разномасштабные структурные впадины типа пулл-апарт, образовавшиеся в результате косою отодвигания Аравийского п-ова от Африки и формирования депрессии Красного моря. Показаны складчатые структуры, возникшие при взаимном встречном перемещении плит [4, с дополнениями].

фическая структурная геометрия. В плане они имеют форму параллелограмма или ромба. Свойственны данные структуры не только континентальной, но и океанской земной коре. Их присутствие установлено в регионах, весьма различных по геологическому строению: в Красном море, на восточном Средиземноморье, в Провинции Бассейнов и Хребтов (штат Невада, запад США). Даже беглый взгляд на контуры Красного моря убеждает в поразительном сходстве его противоположных берегов (рис.6). Такое сходство не случайно и обусловлено тем, что впадина образовалась (что показывает анализ глобальной кинематики плит литосферы) в результате отодвигания Аравийского п-ова от Африки. Раздвиг начался около 30 млн лет назад

и продолжается до сих пор, о чем свидетельствует современная сейсмическая и вулканическая активность вдоль оси Красноморской впадины. Однако движение Аравийского п-ова относительно Африки не чисто раздвиговое, а сопровождается компонентной сдвига, ориентированной на север-северо-восток. В результате вдоль восточного побережья Средиземного моря возникла зона разломов — трансформная граница плит, вдоль которой они скользят относительно друг друга, но с некоторым раздвигом. В южной части трансформного разлома относительно перемещение плит достигало 105 км. Оно вызвало раскрытие нескольких впадин. Самые крупные из них — залив Акаба, Мертвое море, Тивериадское озеро. Кроме того, за счет дифференциального перемещения плит вдоль данной линии часть коры испытала сжатие и образовались Пальмирские складки. На рис.3 видно, что и отдельные крупные сегменты впадины Красного моря, и впадины вдоль трансформной границы плит имеют сходную геометрию. В плане все они представляют собой параллелограммы, хотя и с различным соотношением длины и ширины. Более того, детальные исследования зоны спрединга Красного моря показали, что в пределах больших ее сегментов, ограниченных крупными трансформными разломами, выделяются более мелкие сегменты, границами которых служат короткие разломы. Сегменты, в свою очередь, делятся на еще более мелкие, причем все они также имеют в плане форму, близкую к параллелограмму. В целом размеры таких параллелограммов изменяются более чем в 10 раз.

Структурная геометрия разноранговых депрессий пулл-апарт Красного моря и восточного Средиземноморья сходна с конфигурацией ромбовидных и клиновидных впадин, генетически связанных со сдвигом Олингхауз, расположенным в за-

падной части штата Невада, на границе с Калифорнией (рис.7). Впадины как бы вложены одна в другую, а их днища погружены относительно прилегающей поверхности на несколько десятков метров. Несмотря на различия в региональной геодинамической обстановке, в строении земной коры и в размерах впадин (в Провинции Бассейнов и Хребтов они меньше, чем в Красном море), и геометрически, и генетически они вполне однотипны. В обоих примерах мы наблюдаем отчетливые проявления структурного самоподобия.

Яркие примеры геометрического самоподобия подводного рельефа выявлены при изучении глобальной системы подводных срединно-океанских хребтов (СОХ), имеющей суммарную протяженность более 60 тыс. км. На гребнях СОХ происходит разрастание и наращивание океанской литосферы — спрединг. Ось спрединга маркируется, как правило, невысокими вулканическими сооружениями, возвышающимися над окружающим дном не более чем на 100—200 м. Отличительная особенность геометрии их осевых зон и срединных хребтов — разноранговая сегментация, близкая к наблюдаемой уже на ранней стадии раскрытия океанской впадины (подобную мы видим в Красном море). Сегменты, границами которых служат крупные трансформные разломы, разделяются на сегменты, отделенные друг от друга более мелкими тектоническими нарушениями, а те, в свою очередь, разделяются на более мелкие кулисообразно смещенные линейные вулканические постройки и другие структурные элементы. В итоге выделяют более шести сегментов разных порядков. Четко выраженная разноранговая сегментация сама по себе указывает на высокую степень дробности литосферы. По этой причине гребни срединных хребтов представляют собой хорошие объекты для выявления фрактального структурообразования.

На гребнях СОХ с высокими (от 8 до 12 см/год) и промежуточными (от 4 до 8 см/год) скоростями раздвига плит весьма распространены перекрытия (в плане) осей спрединга самой разной величины. Многие из них детально закартированы с помощью эхолотов высокого разрешения. Геометрия их достаточно проста и вполне поддается сравнительному изучению. Так, на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия в интервале от 16° с.ш. до 20° ю.ш. подробно исследованы 13 перекрытий осей спрединга разного ранга (рис.8,а) и составлены их генеральные схемы, на которых показаны как линейные вулканические гряды, фиксирующие оси растяжения, так и расположенные между ними структурные депрессии, представляющие собой впадины, вытянутые вдоль простирания гребня. Для удобства сопоставления все эти структуры показаны в едином масштабе (рис.8,б). Хорошо видно, что самое существенное их свойство — геометрическое подобие. Длина самой короткой депрессии составляет около

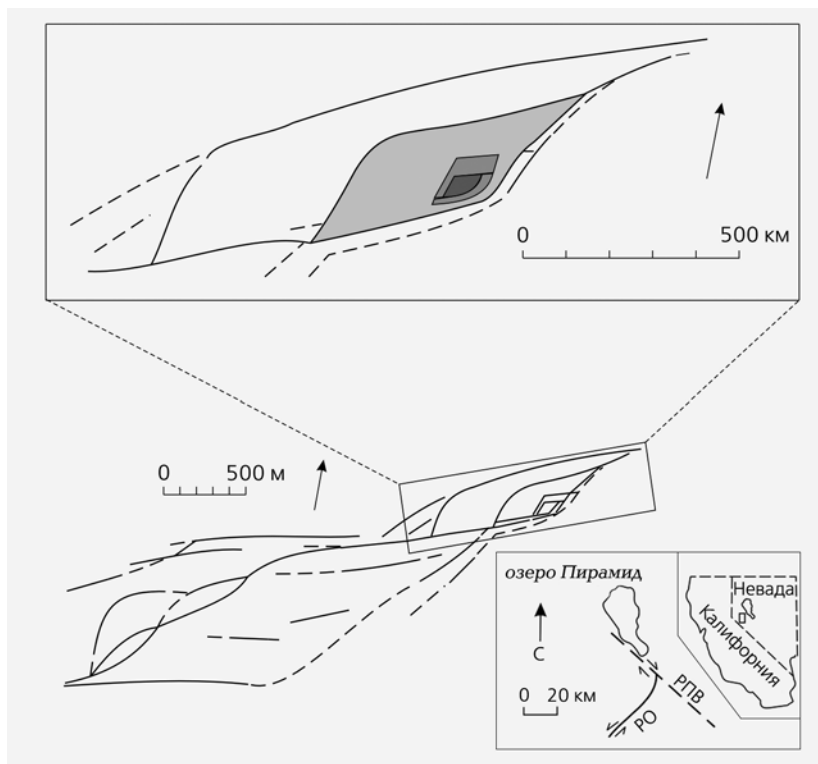


Рис.7. Фрактальное структурообразование на примере масштабно-инвариантных впадин пулл-апарт вдоль разлома — левостороннего сдвига Олингауз на западе Невады (США), положение которого приводится на врезке. Показано последовательное укрупнение масштаба. Более густая штриховка соответствует более глубокой впадине. РПВ — разлом Проход Волкера, РО — разлом Олингауз [5].

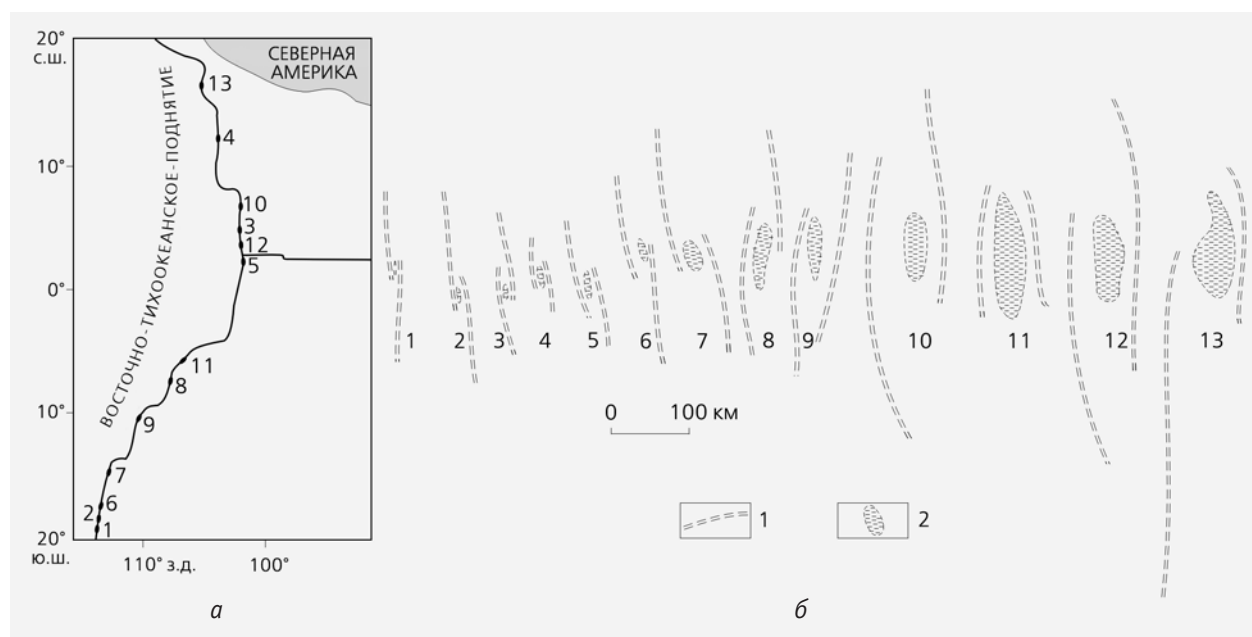


Рис.8. Геометрическое самоподобие перекрывающихся осей спрединга (ПОС) на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия: а — положение ПОС; б — их генерализованные морфотектонические схемы, построенные по результатам детальных исследований подводного рельефа. 1 — оси центров спрединга, 2 — структурные депрессии между ними.

15 км, а самой протяженной — 130 км, длина сегментов оси спрединга, заключенных между соседними перекрытиями, колеблется от 15 до 200 км. При практически неизменной геометрии этих форм рельефа их размеры меняются почти на порядок, что является отчетливым свидетельством масштабного самоподобия.

Многочисленное повторение одного и того же рисунка (узора), уменьшенного или увеличенного в несколько раз, дает возможность ввести количественную оценку самоподобия. В основе лежат довольно простые рассуждения: если отрезок линии разделить на некоторое число частей, равных по длине, то каждая из них будет подобна целому отрезку, но уменьшенному в определенное число раз. Этот же прием можно применить к более сложным геометрическим фигурам и вычислить количественный показатель подобия, который носит название фрактальной размерности. При этом выясняется, что существует многочисленный ряд природных образований, характеризующихся не целой, а дробной величиной.

На основе такого подхода выполнены количественные оценки самоподобия самых разнообразных геоморфологических, геологических и геофизических объектов: очертаний берегов и русел рек, рельефа океанского дна, сети тектонических нарушений, базальтовых вулканов, очагов землетрясений и рудных месторождений, сейсмической расслоенности Земли, делимости литосферы на плиты и блоки, распределения в пространстве зерен в горных породах и др. Не только на качественном, но и на количественном уровне было показано, что все они относятся к категории фрактально организованных, т.е. состоят из элементов с масштабнo-инвариантной геометрией. Отметим также, что методы количественных оценок геометрического самоподобия природных объектов

постоянно развиваются. Для описания свойств многих самоподобных геологических структур недостаточно определения одной фрактальной размерности — требуется целый спектр показателей (так называемых мультифракталов). Разработаны методические приемы их вычисления, и они также начинают использоваться в практике структурно-геологического анализа.

Разумеется, читатель вправе задать вопрос: каким же образом качественный и количественный анализ фрактальной геометрии природных объектов помогает решению проблем геологии? Что принципиально нового следует из того, что большинство геологических объектов оказалось фракталами? Применительно к развитию теоретических основ ответ очевиден: геометрически самоподобные, фрактально организованные объекты не могут возникать в той природной среде, о которой говорилось выше: однородной, равновесной и линейной, неизменной во времени, энергетически пассивной — в среде, где царят законы механики. Другими словами, фрактальность многих геологических объектов требует пересмотра устоявшихся представлений о свойствах геологической среды, т.е. той оболочки Земли, которую мы привыкли называть каменной.

Примерно в одно время с изучением фрактально организованных геологических объектов геофизики (в первую очередь, сейсмологи) проводили интенсивные экспериментальные и теоретические исследования с целью установления свойств литосферы как единого целого. Выяснилось, что иерархия неоднородностей свойственна не только отдельным геологическим объектам, но и литосфере в целом. Она состоит из блоков и отдельных различных рангов и размеров: крупные блоки состоят из более мелких, а те из еще более мелких и т.д. и т.п. [6, 7]. Геофизики

рассмотрели, как происходит переработка энергии в открытой системе, которая состоит из блоков, обладающих упругостью и способных воспринимать энергию и обмениваться ею. Это проливает свет на возможный процесс образования геометрически самоподобных, масштабнo-инвариантных геологических структурных объектов. Проведенные эксперименты и теоретические разработки легли в основу концепции, согласно которой геосреда не только иерархически неоднородна во всем диапазоне пространственных масштабов, но также нелинейна по физическим свойствам и характеру протекающих в ней динамических процессов, изменчива во времени, энергетически активна, чувствительна к внешнему воздействию. Кроме того, благодаря тому, что разноранговые блоки и отдельные, из которых состоит среда, постоянно перемещаются относительно друг друга, она приобретает свойство текучести [8]. Как ни парадоксально это звучит, но такой среде свойственны процессы, весьма сходные с процессами, широко распространенными в воздушной и водной оболочках нашей планеты (хотя, разумеется, несравнимо более медленными). В частности, на основе анализа структурных данных и материалов спутниковых геодезических измерений (GPS) было показано, что в литосфере развиваются разноранговые вихревые движения. Им была специально посвящена одна из статей в журнале «Природа» [9].

Вооружившись теперь знанием о свойствах геосреды и развитии в ней вихревых движений, перейдем к возможной природе мантийных плюмов. Отметим, что и на этой стадии рассмотрения данной проблемы фактор геометрии играет чрезвычайно существенную роль, ибо речь пойдет о связи крупных базальтовых полей с определенными частями вихревых структур.

Поворот научной тропинки: от геометрии к геодинамике

Многие геологи и геофизики уже на ранней стадии обсуждения проблемы природы мантийных плюмов обратили внимание на то, что крупнейшие из провинций платобазальтов расположены отнюдь не беспорядочно. Наиболее крупные из них обнаруживают очевидную пространственно-временную связь с зонами растяжения и раскола мегаконтинента Пангеи. В самом деле, обширнейшие провинции платобазальтов расположены по периферии Индийского океана (Восточно-Африканская и Декан) и в его пределах (банка Сайя-де-Малья, южная часть Маскаренского хребта и Мальдивский хребет), а также по окраинам Атлантического океана (Брито-Арктическая и Парана-Этендека) и внутри него (Исландский регион, вулканические хребты Китовый и Риу-Гранди). Кроме того, время образования трапповых базальтовых провинций чаще всего совпадает с началом раскола Пангеи в соответствующем его регионе. Некоторые исследователи полагают, что разрыв литосферы провоцируют восходящие и растекающиеся в стороны мантийные потоки, другие, напротив, высказывают мнение, что расколы в литосфере вызывают плавление и подъем мантийного вещества за счет резкого снижения давления в мантии — декомпрессии.

Мы же продолжим движение по научной тропинке, которая началась от геометрических рисунков, запечатленных в конкретных образцах горных пород из фондов Геологического музея и которая уже привела нас к концепции нелинейной геосреды и вихревого движения. За следующим ее поворотом открывается оригинальная точка зрения на геодинамическую проблему природы внутриплитного магматизма и восходящих мантийных потоков.

Основу этой точки зрения составляет простое наблюдение, суть которого в том, что некоторые из крупнейших платобазальтовых провинций приурочены к зонам максимального закручивания вихревых рифтово-спрединговых систем. Другими словами, они тяготеют к окончанию трещины, бегущей в теле литосферы и одновременно закручивающейся. Продемонстрируем это на примере двух крупнейших в мире платобазальтовых провинций: Восточно-Африканской и Брито-Арктической. Уже в первых работах по вихревым системам Мирового океана обращалось внимание на то, что спрединговые системы Аденского залива (хребет Шеба), а также срединно-океанские хребты (СОХ) северо-западной части Индийского океана (Аравийско-Индийский и Централно-Индийский) представляют собой гигантский вихрь протяженностью около 8 тыс. км. В раннем эоцене в северо-западной части Индийского океана располагалась ось раздвига плит, впоследствии превратившаяся в Аравийско-Индийский срединно-океанский хребет. Она характеризовалась заметным разворотом в сторону Африканского рога (рис.9,а) и расщепилась многочисленными трансформными разломами. Сам этот факт — дополнительное свидетельство того, что перемещение плит осуществлялось под воздействием вихревого движения. Внутренние и внешние части вихря закручиваются с различной скоростью, что обуславливает возникновение интенсивной сдвиговой компоненты, сопровождающей раздвиг плит. В позднем эоцене, олигоцене и среднем миоцене развитие и вихреобразное закручивание спрединговой системы в западном направлении продолжалось, что привело к окончательному оформлению северо-западной ветви системы СОХ в Индийском океане и «вторжению» зоны раздвига в северо-восточную

часть Африканского континента (рис.9,б,в). Проявилось это «вторжение» двояко. Во-первых, началось постепенное раскрытие Аденского залива, где происходило продвижение зоны спрединга (пропагейтинг) в запад-юго-западном направлении. Во-вторых, была установлена миграция континентального рифтогенеза Восточной Африки с севера на юг.

Первые, локальные по площади и объему, магматические проявления в пределах Восточно-Африканской трапповой провинции происходили в интервале времени 45—37 млн лет назад. В дальнейшем излияния носили дискретный, импульсный характер. Самый мощный импульс (29—30 млн лет назад) приходился на чрезвычайно короткий отрезок времени (около 1 млн лет). Тогда практически полностью сформировалось базальтовое плато. Другими словами, магматизм носил почти взрывообразный характер. По времени это, по существу, катастрофическое событие совпадает с заложением северной части рифтовой системы Восточной Африки (рис.9,б).

Наконец, в современную эпоху зона спрединга хребта Шеба, представляющая собой ветвь системы СОХ северо-западной части Индийского океана, сопрягается с системой Восточно-Африканских рифтов не напрямую, а по более сложной кинематической схеме: через Африкано-Аравийское тройное сочленение (рис.9,г). В него кроме Аденской рифтовой зоны и Красноморского рифта входит также депрессия Афар, сформировавшаяся в результате откола от Нубийской (Африканской) плиты небольшой континентальной Данакильской микроплиты. Таким образом, вспышка траппового магматизма Восточной Африки и пространственно, и по времени связана с областью и эпохой максимального закручивания вихревой спрединговой системы. При этом важно отметить спе-

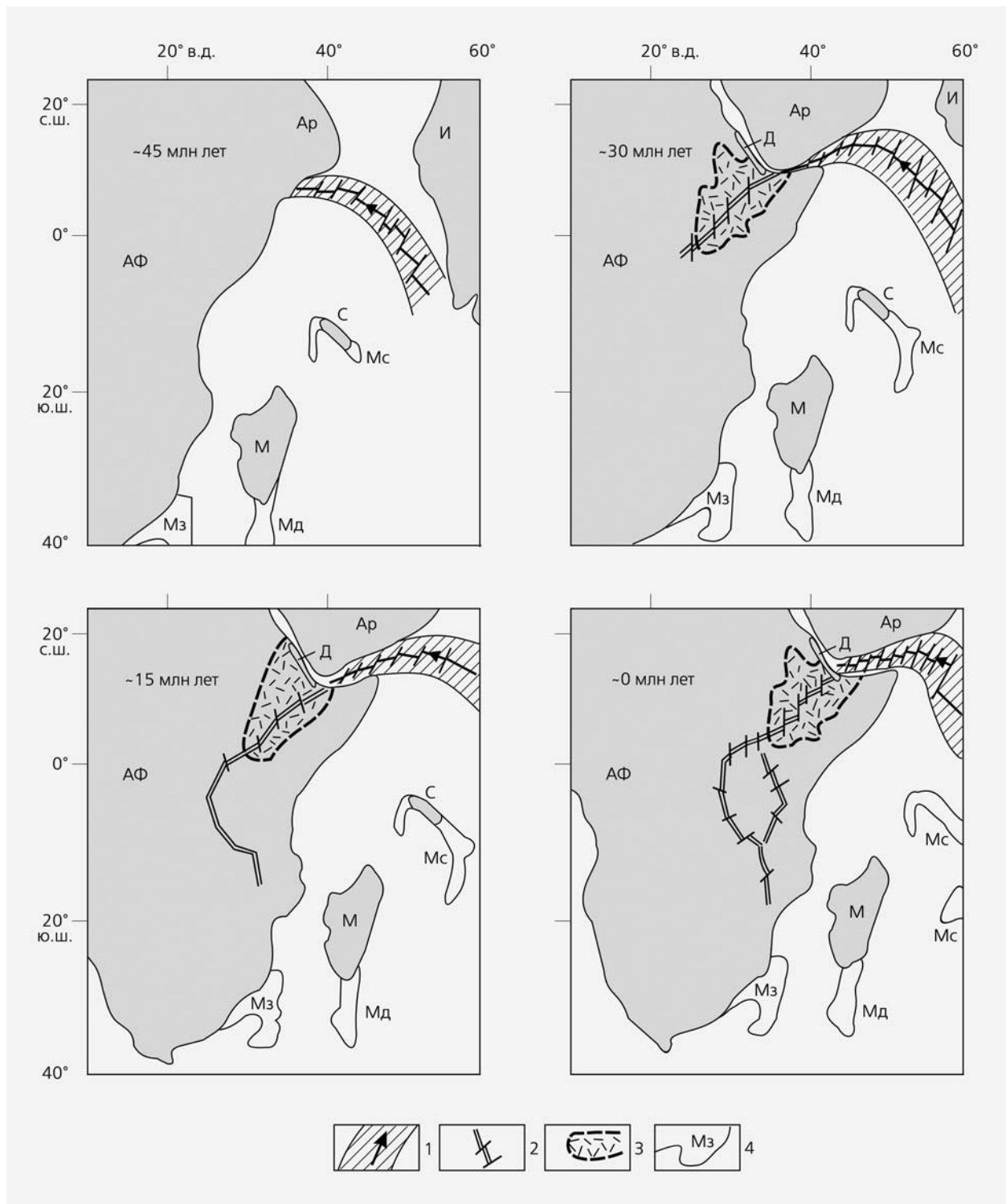


Рис.9. Эволюция вихреобразных спрединговых систем Аденского залива, Аравийско-Индийского и Центрально-Индийского срединно-океанских хребтов (северо-западная часть Индийского океана); континентальный рифтогенез и образование трапповой провинции Восточной Африки. Приводятся реконструкции положения континентов и положение спрединговых систем для возрастных срезов, указанных на рисунке. 1 — оси спрединга и спрединговые системы, стрелками показано направление пропегейтинга; 2 — континентальные рифты; 3 — трапповая провинция; 4 — подводные хребты предположительно вулканической природы: Мс — Маскаренский, Мд — Мадагаскарский, Мз — Мозамбикский. Аф — Африка, Ар — Аравия, И — Индостан, М — о.Мадагаскар, Д — Данакильская микроплита, С — Сейшельский микроконтинент, Р — о.Реюньон.

цифику пространственно-временных изменений геодинамической обстановки: сжатие и сдвиг на ранней стадии эволюции вихря сменились растяжением. Обращает на себя внимание присутствие там Данакильской микроплиты, которая вращалась (и продолжает вращаться) со значительной угловой скоростью.

Обратимся к Брито-Арктической провинции (рис.10). Особенность ее эволюции состоит в интенсивном рифтогенезе, который предшествовал расколу единого материка Лавразии в позднем мезозое. Пространственно-временная неравномерность рифтогенеза обусловила возникновение сложной мозаики блоков с субокеанской и субконтинентальной корой. Отделение Гренландии от Евразии в позднем палеоцене произошло не вдоль континентальных рифтов, а вдоль осевой линии срединно-океанских хребтов Рейкьянес, Кольбейнсей, Эйгир (в Норвежской котловине) и Мона. В то время заложилась зона растяжения коры к юго-востоку и северо-западу от микроконтинента Ян-Майен. В результате он обособился в самостоятельную, небольшую по размеру континентальную литосферную плиту. Принципиально важно, что уже на ранней стадии эволюции океаногенеза ветвь зоны растяжения к юго-востоку от этой микроплиты характеризовалась отчетливо выраженной тенденцией к вихреобразному закручиванию в южном направлении, причем пропагеттинг оси раздвига происходил в направлении северо-восток—юго-запад. Центр магматической активности пространственно как раз и связан с районом наибольшего закручивания зоны растяжения, как это свойственно и Восточно-Африканским платобазальтам. Однако сходство между ними этим не ограничивается. Основная вспышка траппового магматизма в пределах Брито-Арктической провинции тоже продолжалась не 1 млн лет

и приурочена к эпохе первоначального раскола и разделения континентов. Кроме того, по всем характеристикам (геофизическим и кинематическим) Ян-Майенская микроплита весьма сходна с Данакильской. Обе вращались с очень высокой угловой скоростью.

Подчеркнем важное обстоятельство: и другие гигантские по площади трапповые провинции, такие как Декан на западе п-ова Индостан, Парана-Этендека в Южной Америке и в Африке, также обнаруживают отчетливую связь с вихревыми структурами литосферы.

Таким образом, видно, что платобазальтовый магматизм рассматриваемых регионов генетически связан с рифтово-спрединговыми системами, развивающимися в результате вихреобразных движений в нелинейной геосреде. Попытаемся разобраться в сути этой связи. Как следует из концепции нелинейной геосреды, движущим фактором многих геодинамических процессов (образования трещин, возникновения очагов землетрясений, плавления горных пород и др.) служит энергия, заключенная в самих горных породах, которая высвобождается при том или ином воздействии на них. Какова же природа такого воздействия в зоне максимального закручивания вихревой рифтово-спрединговой системы? Особенности движения вихревого типа заключается в том, что вовлеченные в него массы вещества перемещаются не только поступательно, но и закручиваются. При этом малые объемы (блоки, частицы вещества) вращаются вокруг некоторой оси, положение которой меняется со временем. Под влиянием вихревой компоненты при раскрытии океанской впадины ее ось приобретает закругленные очертания на начальной стадии и сохраняет их на стадии формирования срединно-океанского хребта и зон раздвига земной коры на его гребне (как это

имеет место в большинстве океанских бассейнов). При раскрытии океанского бассейна литосферные плиты в целом и вновь формируемые их части в зонах наращивания плит вращаются не только вокруг общего полюса, но и вокруг различных полюсов, что приводит к возникновению вдоль данной зоны составляющей сдвига, которая меняется не только вдоль простирания, но и по мере закручивания вихревой спрединговой системы. Как результат, в процессе раскрытия океана изменяется геодинамическая обстановка. В каждой точке зоны наращивания происходит смена напряжений — от сжатия (со сдвигом) к растяжению (со сдвигом). Существенно, что градиент перехода не остается постоянным, а увеличивается по мере закручивания вихря.

Для рассматриваемой проблемы принципиально важно, что мощные излияния базальтовых лав в местах максимального закручивания вихревых систем по времени приурочены к периодам, когда сжатие сменяется растяжением. При этом основной объем базальтов извергался за очень короткое (по геологическим меркам) время (несколько миллионов лет). В данном случае внешнее воздействие на среду, которое может приводить к образованию магматических очагов, заключается в пульсирующем, периодическом чередовании роста давления (и, соответственно, накопления энергии) и последующего его резкого уменьшения (с резким понижением температуры плавления). Результаты проведенных лабораторных экспериментов над твердыми веществами подтверждают тот факт, что при высоком внешнем давлении в сочетании со сдвигом разрушение горной породы за счет экзотермических реакций приобретает форму взрыва [10]. Градиент сброса давления и, следовательно, интенсивность и объем плавления меняются вдоль простирания вихревой системы, до-

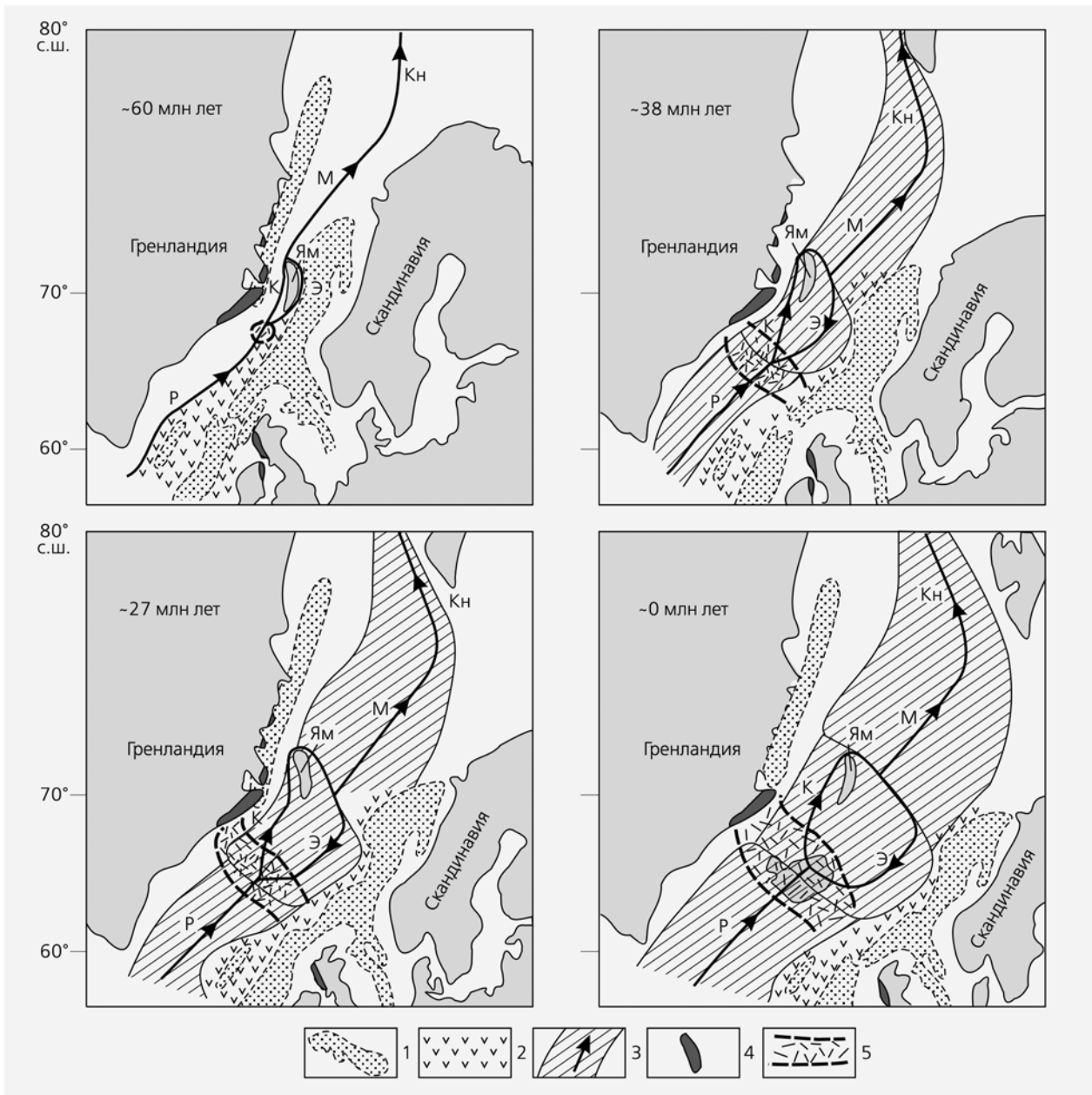


Рис.10. Континентальный рифтогенез, эволюция вихреобразных спрединговых систем в Исландском регионе и возникновение Брито-Арктической трапповой провинции. Приводится реконструкция положения плит и их границ для возрастных срезов, указанных на рисунке. 1 — мезозойские осадочные впадины рифтогенной природы; 2 — поднятия фундамента и микроконтиненты; 3 — оси спрединга и спрединговые системы срединно-океанских хребтов: Рейкьянес (Р), Кольбейсей (К), Эйгир (Э), Мона (М) и Книповича (Кн). ЯМ — микроконтинент Ян-Майен; стрелками показано направление пропегейтинга оси раздвига; 4 — области траппового магматизма по периферии региона, 5 — область платобазальтов Исландии и прилегающих районов океанского ложа.

стигая максимума в области ее максимального закручивания. Именно в этих районах с сильно выраженными структурными и вещественными неоднородностями наиболее вероятны воздействия на среду, приводя-

щие к образованию магматических очагов.

Таким образом, природа связи крупнейших платобазальтовых провинций со структурными неоднородностями литосферы, а также феномен чрезвычай-

но кратковременного (взрывоподобного) извержения с наибольшим объемом трапповых базальтов становятся более понятными, если исходить из теоретических предпосылок о характере процессов в метаста-

бильной геосреде, а не из представлений об их формировании за счет медленно восходящих мантийных потоков — плюмов. В то же время предлагаемая модель вовсе не исключает восходящих потоков разогретого глубинного вещества, образующих узкие субвертикальные каналы. Некоторые из них устанавливаются по данным сейсмической томографии, но их природа рассматривается с принципиально иной точки зрения. Ранее уже высказывалась гипотеза о том, что они связаны с вихревыми движениями повышенной интенсивности [9]. Дополнительное и существенное указание в пользу этой точки зрения — присутствие во всех рассмотренных нами трапповых провинциях микроплит со скоростью вращения, превышающей примерно в 10 раз скорость вращения крупных плит литосферы. Не исключено, что столь быстрое движение обусловлено именно интенсивными (разумеется, с учетом рассмотренных выше свойств среды) вихревыми движениями. Такие вихри в атмосфере сопровождаются весьма мощными восходящими потоками. Это же свойственно и вихрям в мантии, которые и выносят к поверхности вещество, обогащенное глубинной компонентой.

Другими словами, восходящие потоки мантийного вещества существуют, но зарождение их обусловлено нелинейными процессами, происходящими в самой тектоносфере, и благодаря нестабильности и неустойчивости слагающего ее веществ-

ва. Такие потоки создают необходимые условия для кратковременного, чрезвычайно мощного ареального магматизма, существующего на фоне общего сводового поднятия кровли литосферы. Очевидно тем не менее, что степень нелинейности геофизической среды, как и спектр воздействия на нее, достаточно разнообразна. Соответственно, и «отклики» на это воздействие применительно к формированию магматических очагов могут быть существенно различны: от образования единичного подводного вулкана до формирования гигантской платобазальтовой провинции.

* * *

Итак, научная тропинка, начавшись с геометрии, запечатленной в образцах из фондов Государственного геологического музея и в геологических структурах, приводит к важному геодинамическому выводу. Суть его в том, что наряду со струйными и медленными конвективными течениями, охватывающими всю мантию, в твердых оболочках Земли возможны относительно интенсивные вихревые движения. Отчетливо просматривается принципиальная аналогия с динамическими процессами во внешних оболочках Земли. В пользу сходства геосреды с другими природными средами говорят данные о ясно выраженной сейсмической стратификации литосферы в тех районах, где проводились детальные томографические исследования. Отчетливая стратификация по физическим харак-

теристикам — неотъемлемое свойство и водной, и воздушной природных сред, что обуславливает их чрезвычайно высокую неустойчивость.

Суть тех изменений, которые сейчас происходят в геологии, — пересмотр представлений о свойствах геологической среды, т.е. основного природного объекта, изучаемого геологами. Для нашей науки фрактальная геометрия играет особую роль. Весьма показательна судьба мобилистской плитотектонической модели, которая возникла как следствие очевидного геометрического факта — сходства очертаний противоположных берегов Атлантического океана. Как выясняется, процесс дальнейшего развития геодинамической парадигмы также в значительной мере основывается на геометрических предпосылках, а именно на особенностях структурной геометрии разноранговых геологических объектов: от образцов горных пород и минералов до контуров континентов и океанов.

Впереди у исследователей «твердой» Земли совместные работы со специалистами в области физики других природных сред — атмосферы и океана, которые несомненно приведут к важным результатам в изучении природы многих геологических структур. Но для этого геологам необходимо иметь на вооружении не только молоток, но и современные методы изучения нелинейных систем, в том числе анализ фрактальной геометрии самых различных геологических объектов. ■

Литература

1. *McGeary D., Plummer C.C.* Physical Geology. Earth Revealed. 1992.
2. *Берчфил Б.К.* // В мире науки. 1983. №11. С.60—72.
3. *Mandelbrot B.* The Fractal Geometry of Nature. San-Francisco, 1983.
4. *Францито Ж.* // В мире науки. 1983. №11. С.44—59.
5. *Aydin A., Nur A.* // Tectonics. 1982. V.1. №1. P.91—105.
6. *Садовский М.А.* // Вестник АН СССР. 1986. №8. С.3—11.
7. *Keilis-Borok V.I.* // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V.61 P.1—7.
8. Проблемы геофизики XXI века. Кн.1. М., 2003.
9. *Мишлин Е.Г.* Вихри и смерчи в твердых оболочках Земли: возможны ли они? // Природа. 2006. №2. С.33—42.
10. *Ениколопян Н.С., Вольева В.В., Хзарджян А.А., Еришов В.В.* // Докл. АН СССР. 1987. Т.292. №5. С.1165—1169.

Лесной форпост в сухих степях

В.В.Неронов

Дьяковский (Салтовский) лес на крайнем юге Саратовского Заволжья по границе с Волгоградской областью — это самый южный лесной массив в сухих степях юго-востока Европы. Начиная с 2000 г. в его окрестностях на стационаре Саратовского филиала Института проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН (ИПЭЭ) в дер.Дьяковка (Краснокутский р-н) экспедиция под руководством С.А.Шиловой ежегодно проводит полевые исследования растительности и животного мира. Некоторыми результатами этих работ, а также наблюдениями, полученными во время экскурсий по лесу вместе с моим постоянным спутником — сотрудником Государственного биологического музея им.К.А.Тимирязева М.В.Касаткиным, автору хотелось бы поделиться с читателями «Природы».

Реликтовый ландшафт Приерусланских песков

Сам Дьяковский лес — это островки березовых, осиновых и дубовых древостоев, занимающих сравнительно небольшую часть сильно всхолмленных Приерусланских песков. Их массив приурочен к обширной котловине площадью 18 642 га с толщей песка 10–25 м в пределах второй надпойменной террасы р.Еруслан — последнего левобережного притока Нижней



Владимир Валерьевич Неронов, кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН. Занимается вопросами функционирования и динамики экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов.

Волги. Со всех сторон пески окружены поднимающимися в сторону Общего Сырта необозримыми просторами равнинных типчаково-ковыльных степей на светло-каштановых почвах, ныне значительно распаханых. Эти сельскохозяйственные угодья представлены полями озимой ржи, яровой и озимой пшеницы, ячменя, овса, подсолнечника и бахчевых культур. Однако в последние годы многие пашни остаются невостребованными для посевов культурных растений, благодаря чему на разновозрастных залежах можно наблюдать восстановление зональной степной растительности. В сравнении с другими лесными массивами, Дьяковский лес расположен ближе всего к зоне полупустыни, что в совокупности с реликтовым характером делает его уникальным объектом природы, особенно в плане изучения биологического разнообразия [1].

Некоторые специалисты считают, что Приерусланский песчаный массив образовался в результате накопления аллювиальных толщ в древней дельте р.Еруслан, впадавшей во время хвалынской трансгрессии напрямую в Каспийское море. Полагают также, что пески представляют собой древнеаллювиальные отложения, слагающие самую высокую (бакинскую) надпойменную террасу долины Волги. В любом случае после отступления морского бассейна песчаные осадки неизбежно испытали вторичное золовое переживание и приобрели современные черты рельефа. Таким образом, временем формирования ландшафта Приерусланских песков можно считать ранний голоцен, т.е. примерно 10–8 тыс. лет назад. Очевидно, что современные условия лесопроизрастания в этом районе весьма неблагоприятны, и лесной остров смог сохраниться до наших

дней с той далекой эпохи лишь благодаря особому водному режиму песков, в частности близкому залеганию грунтовых вод. Именно поэтому практически все лесные участки приурочены здесь к понижениям рельефа и тесно связаны с аккумуляцией пресной воды песчаными наносами, которые на глубине имеют естественный водоупор.

Рельеф Дьяковского леса представляет собой чередование песчаных бугров высотой от 3 до 5 м, межбугровых понижений, котловин выдувания и относительно ровных участков. Отдельным геоморфологическим элементом можно считать так называемые копани — относительно неглубокие (1–2 м) ямы, образовавшиеся при выемке глины для строительства и обмазки деревенских построек и нередко заполненные водой. Климатические условия весьма суровы: холодная и мало снежная зима, непродолжительная и засушливая весна, жаркое и сухое лето. Среднегодовое количество осадков составляет

здесь примерно 300 мм, а коэффициент увлажнения — менее 0,4, что соответствует сухостепным условиям. Зимний сезон продолжается, как правило, с первой декады ноября по конец марта. Средняя температура января составляет -12.2°C (при абсолютном минимуме -41°C), а высота снежного покрова — около 15 см, что приводит к промерзанию почвы на глубину до 70–80 см. Ледостав на Еруслане приходится на вторую декаду ноября, а его вскрытие весной происходит в первой декаде апреля. Летние максимумы температуры достигают $40-41^{\circ}\text{C}$ при средней температуре июля 22.7°C .

Растительность Дьяковского леса

Как уже упоминалось, Дьяковский лес не настоящий (в привычном смысле этого слова), как об этом можно было бы судить по названию, а скопление отдельных лесных куртин и рощ.

Эти мелкие островки древостоев, именуемые колками, чередуются с открытыми песчано-степными участками, сырыми луговинами, полянами и зарослями низкорослых степных кустарников. По данным Дьяковского лесхоза, на общей лесопокрывной площади 8056 га насчитывается более 1100 фрагментарных участков леса: самых мелких (0,1–0,25 га) — около 60%, более крупных (0,26–1 га) — 25%, крупных (1–3 га) — 10%, а самых крупных (3–10 га и более) — менее 5% от общего числа. При этом естественная лесная растительность в настоящее время занимает сравнительно небольшую часть (3472 га), тогда как остальные 4584 га находятся под искусственными культурами.

Зональный растительный покров окружающей территории представлен в окрестностях дер. Дьяковки типчаково-ковылково-тырсовыми степями на светло-каштановых суглинистых солонцеватых почвах. Они относятся к Заволжско-Казахстанской степной провинции



Характерный ландшафт Дьяковского леса.



Березовые колки — наиболее распространенный компонент древесной растительности.



Осинник после пожара.



Фрагменты дубняков.

Евразийской степной области, большинство степных участков либо распашано, либо подверглось деградации из-за перевыпаса скота. Из-за резкого сокращения интенсивности сельскохозяйственной нагрузки в последнее десятилетие здесь, как и во многих других районах европейского юго-востока, наиболее характерным процессом стала демутиация растительности на залежах и пастбищах.

Растительные сообщества внутри лесного массива чрезвычайно разнообразны. Здесь соседствуют ассоциации лесной, лугово-болотной, степной кустарниковой и песчано-степной растительности [1, 2]. К основным лесообразующим породам относят березу, осину и дуб черешчатый, изредка встречается ольха черная. Наибольшие пло-

щади заняты березовыми (75%) и березово-осиновыми (15%) колками, незначительная доля приходится на чистые осинники (7%) и дубняки (3%). В состав искусственных насаждений и лесополос, примыкающих к лесу, входят также обыкновенная и крымская сосны, мелколистный и обыкновенный вязы, древовидная акация, серебристый тополь и некоторые другие древесные породы. Повсюду в примеси встречаются яблоня лесная, боярышник отогнуточашелистикový, шиповник собачий и бересклет бородавчатый. Берега ручьев и стариц покрывают густые ивняки.

Березовые и березово-осиновые колки приурочены к неглубоким понижениям между песчаными буграми, а по опушкам окаймлены густым бордюром кустарниковых зарослей. Чистые осинники встречаются в более влажных котловинах и понижениях с заболоченными почвами. Типичные колки характеризуются загущенностью и сомкнутостью крон. Березы в этих условиях обычно достигают 20–30-летнего возраста и чаще всего развиваются от пневой поросли, образуя «кусты», состоящие из 2–5 стволов. Они сразу привлекают внимание своими необычайно корявыми, причудливо извилистыми стволами, резко выделяющимися белизной на фоне ярко-зеленой листвы. Их размеры редко превышают 10 см в диаметре и 6–8 м в высоту.

Наибольшую ценность для лесного хозяйства представляют дубняки, которые сохранились по кромке песков, склонам стариц и прилегающим к ним берегам Еруслана в виде небольших по площади полос. Ограниченное распространение дуба обусловлено сплошными рубками и пожарами в недалеком прошлом. Чистый дубняк занимает только непосредственно склон, каким бы крутым он ни был, а подрост этой породы возобновляется в основном на верхней и нижней опушках.



Сосняки целиком представляют искусственные посадки.

Подлесок обычно отсутствует, а в травяном покрове господствует ландыш майский, а также некоторые лесные и опушечные растения. Нижняя опушка полосы дубняка примыкает к густым зарослям пепельной ивы, растущей по влажному днющу старицы, где летом местами нередко застаиваются лужи воды, питающие влажнотравно-осоковые болотца. На противоположном склоне юго-восточную опушку дубняка составляют уже не осина и осокорь, а сплошная поло-

са непролазных зарослей клена татарского. Нередки здесь дикие яблони, очень много терна и боярышника.

Все сосняки Дьяковского леса представляют собой искусственные посадки и, за исключением старовозрастных боров, являются монокультурами. Они рассредоточены по всему лесному массиву в виде небольших островков и имеют различный возраст. Под сомкнутыми кронами сосен травяной покров зачастую отсутствует, нет ни под-

леска, ни опушечного бордюра из кустарников. В молодых посадках травяной ярус образован растениями, характерными для окружающей песчаной степи. В последнее время на территории Дьяковского лесхоза происходит сокращение лесистых территорий, занятых березой, осиной и вязом мелколистным, площади же под насаждениями сосны обыкновенной, ясеня зеленого и клена ясенелистного, напротив, постепенно увеличиваются [3]. Распространение одновозрастных монокультур, большинство из которых можно отнести к насаждениям «без будущего», приводит к снижению устойчивости лесных массивов — поражению их грибковыми болезнями и насекомыми-вредителями, а также к увеличению числа и интенсивности пожаров.

Особая роль в Дьяковском лесу принадлежит искусственным посадкам ивы остролистной (шелюги). Произведенные более века тому назад с целью закрепления разбитых песков, в настоящее время они занимают значительные площади. Растущая высокими кустами (до 4 м, а иногда и выше) эта ива лучше других древесных пород удерживается на сыпучих песках, возобновляясь корневой порослью после рубок.

По материалам собранного гербария и литературным источникам здесь установлено произрастание около 500 видов сосудистых растений, среди которых насчитывается более 70 одних только древесно-кустарниковых пород. Некоторые виды, обнаруженные в Дьяковском лесу [2, 4], на остальной территории Нижнего и Среднего Заволжья южнее Самары больше нигде отмечены не были. Реликтовое происхождение многих из них, например папоротника телиптериса болотного, ятрышника клопоносного, хохлатки полой и др., не вызывает сомнений. В то же время Дьяковский лес в современных условиях стал убежищем не только для лесных, но и для

многих редких степных видов. Всего же здесь произрастают 23 вида высших растений, нуждающиеся в охране [1], два из которых (ятрышник шлемовидный и прострел луговой) занесены в Красную книгу СССР (1984), а еще три (ятрышник клопоносный, рябчик русский и касатик низкий) — в Красную книгу РСФСР (1988).

Животные лесного массива

Сохранившиеся массивы островных лесов оказывают непосредственное влияние на формирование разнообразия наземных животных. Тесное соседство закрытых лесных и открытых степных стадий создает среду обитания для многих видов млекопитающих и птиц — от обитателей полупустынь и степей до типично лесных представителей фауны.

Как показали орнитологические наблюдения [5, 6], из гнездящихся в Дьяковском лесу насекомых птиц наиболее многочисленны сорока, иволга, соловей, варакушка, зеленая лазоревка и несколько других. В гнездовое время с наибольшей плотностью птицами заселены средневозрастные ландышевые пристаричные дубняки и березово-осиновые колки, которые богаче других типов насаждений укрытиями и изобилуют насекомыми. Характер ветвления дуба благоприятен для устройства гнезд многих кронников, а его густая листва защищает птиц от палящих лучей солнца и хищников. Наиболее многочисленны в дубняках сороки, зеленые лазоревки и большие синицы. Довольно высока доля иволги, красивый флейтовый свист которой можно часто слышать в пойменной уреме и средневозрастных высокоствольных насаждениях. Почти исключительно в молодых дубняках и ивняках близ русла реки и стариц отмечен соловей. С большой плотностью заселены дубняки и хищными птица-

ми, среди которых наиболее заметен черный коршун. Высматривая сверху свою добычу, он подолгу парит на большой высоте. Довольно обычна в лесу и обыкновенная пустельга — мелкий сокол, отличающийся характерным полетом — во время него птица часто «приостанавливается» — зависает в воздухе — с поднятыми крыльями и опущенным хвостом.

В березово-осиновых колках, в кустарниках, гнездятся мелкие насекомоядные птицы. Среди них особенно характерны варакушка, серая и садовая славки, садовая овсянка и полевой конек. Довольно часто встречаются серые куропатки. Нередки также перепела, устраивающие свои гнезда на открытых участках с сомкнутым травянистым покровом. Их характерный «бой», особенно интенсивный на утренних и вечерних зорях, можно постоянно слышать с поздней весны вплоть до середины лета — времени уборки хлеба. В перелесках и по опушкам обычны кукушки и горлянки. Большой пестрый дятел встречается очень редко. В Дьяковском лесу почти нет толстых осин, сгнивших настолько, чтобы птица могла без труда выдолбить в них дупло.

В состав немногочисленного сообщества птиц в зарослях степных кустарников на песках (раkitника русского, спиреи зверобоелистной, шелюги) входят садовая овсянка, серая славка, луговой чекан и некоторые другие [7]. Поскольку в подзоне сухих степей подобные биотопы представлены на сравнительно небольшой площади, населяющие их виды принимают незначительное участие в формировании степного орнитокомплекса. Самое же малочисленное птичье население в ряду древесно-кустарниковых биотопов характерно для сосновых монокультур и посадок шелюги, которые отличаются недостатком укрытий и низкой кормовой базой. Обычно в гнездовой период ивняки заселяют только



Ушастая сова — обитатель средневозрастных лесов.



Детеныш желтого суслика у норы.



Ковыль песчаный — доминант степных ассоциаций Приерусланских песков.



Типичный представитель степного разнотравья — подмаренник настоящий.



Значительные площади в окрестностях леса заняты агроценозами.

полевой конек и садовая овсянка, но во второй половине лета здесь начинают попадаться стайки кочующих славок, пеночек и варакушек.

На примыкающих к лесу степных участках и залежах доминируют полевой жаворонок и луговой лунь. Среди мелких воробьиных весьма обычны садовая овсянка, пересмешка-бормолушка, серая славка и луговой чекан, а в местах, где имеются сусличьи норы, — и каменка-плясунья, которая использует их для устройства своих гнезд. Из представителей других отрядов здесь гнездятся серая куropатка, перепел, журавль-красавка и болотная сова. В локально распространенных луговых ассоциациях, приуроченных в Приерусланской степи к понижениям, встречаются желтая и желтолобая трясогузки, а также большой кроншнеп и чи-

бис — самые многочисленные для этих мест кулики [7].

В состав орнитофауны Дьяковского леса и прилегающих участков входит довольно много птиц, подлежащих особой охране, среди которых имеются виды, занесенные в Красные книги СССР (орлан-белохвост, балобан, журавль-красавка, дрофа, стрепет) и России (канюк-курганник, авдотка). Особое внимание на стационаре ИПЭЭ РАН уделяется изучению и охране дрофы, проводится научно-исследовательская и практическая работа по сохранению и восстановлению численности этого вида в Саратовском Заволжье.

При довольно высоком видовом разнообразии Дьяковского леса здесь почти отсутствуют или крайне редки такие типичные птицы широколиственных лесов, как пестрый дятел, малая мухоловка, дрозды, гаечки; го-

раздо меньше здесь и зябликов. Этот массив не играет заметной роли как источник расселения птиц по лесопосадкам, орнитофауна которых формируется преимущественно за счет местных видов [6].

Фауна млекопитающих Дьяковского леса и прилегающих участков массива Приерусланских песков также довольно разнообразна [8, 9], хотя изучена еще далеко не достаточно. По имеющимся оценкам, здесь зарегистрировано более 40 видов [10], относящихся к шести отрядам. Из насекомоядных довольно многочисленны обыкновенный еж и два вида землероек-бурозубок (обыкновенная и малая). В результате недавно проведенных исследований здесь была обнаружена островная популяция хромосомной расы Сок обыкновенной бурозубки на южной границе ареала [11].

При зимних учетах землеройки присутствовали во всех обследованных биотопах. В березовых колках и дубняке доминирующее положение занимали обыкновенная и малая бурозубки, доля которых в общих уловах составляла 41.5 и 26.8% соответственно [9]. Дополнительные исследования популяции обыкновенной бурозубки с использованием ловушек оригинальной конструкции показали, что в дубняках их плотность в мае составляла 17.3 особей/га, а в березовых колках — 0.9 особей/га. В песчаной степи и кустарниковых зарослях отловлена только малая бурозубка. Довольно редкий вид — малая белозубка.

Из мышевидных грызунов фоновый вид в разнообразных биотопах, несомненно, — малая лесная мышь. Чаще всего она предпочитает влажные дубняки и березово-осиновые колки, откуда широко расселяется по остальной территории, включая степные участки, залежи и агроценозы. В начале июня численность этого вида в дубняке достигала 20 особей на 100 отловленных в сутки. Обыкновенная полевка встречается в дубняке, березовых колках и на степных участках среди леса. Ее вид-двойник — восточноевропейская полевка — явно тяготеет к более влажным местообитаниям, достигая наибольшего обилия на пойменных лугах [8]. Степная мышовка тяготеет к сообществам лугового типа и участкам песчаной степи. Довольно редкий вид — мышь-малютка обнаружена только на пойменных лугах [8].

Среди грызунов очень интересен представитель степной фауны — обыкновенный хомяк, который нередко поселялся вблизи построек человека и долгое время замещал там серую крысу. В последние десятилетия численность его заметно сократилась, однако и теперь он постоянно встречается в заросших густыми бурьянами копанях по окраинам дер Дьяковки.

Один из наиболее примеча-



Выборочные рубки — один из факторов антропогенного воздействия на лесной массив.

тельных ландшафтных видов грызунов Приерусланских песков — желтый суслик, населяющий здесь разнообразные местообитания. Еще в 1929 г. Е.И.Орлов детально изучил его поселения и основные черты экологии [12]. Норы желтого суслика на лесной площади встречаются в небольшом количестве, главным образом в окраинных частях на открытых пространствах песчаной степи между колками. В настоящее время сотрудники экспедиции ИПЭЭ РАН (А.В.Чабовский, В.С.Попов, Л.Е.Савинецкая, Н.А.Васильева) изучают особенности пространственной и социальной организации этого вида в биотопах по соседству с Дьяковским лесом.

Из других грызунов пустынно-степного фаунистического комплекса, населяющих Дьяковский лес, необходимо отметить малочисленного большого тушканчика и повсеместно встречающуюся обыкновенную слепушонку. Первый вид чаще обнаруживается по окраинам леса на уплотненных песках и избегает слабозакрепленных песков. Поселения слепушонки отличаются обилием небольших (до

40—45 см в диаметре и до 10—12 см высотой) выбросов земли, которые то беспорядочно лежат на поверхности земли, то тянутся друг за другом единой цепочкой. К редким видам в настоящее время относятся степная пеструшка, малый тушканчик и тарбаганчик.

К основным охотничьим зверям в Дьяковском лесу принадлежат лось, косуля, кабан и заяц-русак, а к второстепенным — лисица, степной хорь, барсук, европейская куница и горноста́й [13]. Кроме них из отряда хищных встречаются волк, корсак и ласка. Дикие копытные (лось, косуля, кабан) тесно связаны с лесными участками и в теплое время года держатся в основном по пойменным лесам и кустарникам, а также осиново-березовым колкам. Здесь после таяния снега животные находят наиболее подходящие условия: хороший корм, водопой и необходимые укрытия, а на опушках, обдуваемых ветром, — спасение от гнуса. В многоснежные зимы отмечены их дальние выходы из леса на старые залежи и забурьяненные участки степи. Особенно страдают от морозов и мно-

госнежья кабаны, которые в такие зимы нередко гибнут от истощения.

Один из наиболее многочисленных видов Дьяковского леса — заяц-русак, для которого чередование лесных и открытых стадий в условиях массивов островных лесов создает оптимальные условия существования. Летом этот вид находит здесь благоприятные места для размножения, что связано с наличием высоких песчаных бугров, сенокосных лиманов с разнотравьем и обилием осиново-березовых колков. В зимний период в Приерусланских песках зайцы предпочитают кормиться и передвигаться по малоснежным местам с уплотненным настом, избегая участков с высоким и рыхлым снегом. Весьма высока в лесном массиве и плотность лисицы, которая селится здесь на опушках и полянах колков, в зарослях кустарников и пойме, но прежде всего заселяет старые барсучьи норы, устроены на возвышенных местах вблизи или в глубине бере-

зовых колков. Питаются эти хищники в основном мелкими грызунами, чаще всего — обыкновенными полевками [14]. Малая доля зайцев среди лисьих жертв объясняется тем, что взрослых русаков она ловит редко, а зайчат в песках почти не бывает — большинство их прячется в окрестных полях.

Долинные и пойменные леса Еруслана, наряду с лесными видами, заселены и некоторыми околводными обитателями, в частности водяной полевкой, ондатрой и американской норкой. В очень небольшом количестве в высокоствольных древостоях встречается европейская куница. Скопления опавших желудей в пойменных дубравах представляют собой обильные запасы корма для мышевидных грызунов, прежде всего для лесной мыши, которая достигает здесь высокой численности.

* * *

В заключение необходимо подчеркнуть, что эта статья не была бы возможна без любезно-

го содействия главного лесничего Дьяковского лесхоза В.П.Ескова, а также директора Саратовского филиала ИПЭЭ им.А.Н.Северцова РАН А.В.Хрустова. Флора и фауна Дьяковского леса изучены недостаточно. В плане дальнейших зоолого-ботанических исследований этот сохранившийся лесной массив юга степной зоны особенно перспективен как уникальная природная модель для разработки теории островной биогеографии. Изменение экосистем островных лесов, связанное с неоднократными сменами ландшафтов на протяжении голоценовой истории, обусловило наличие в составе биоты разнообразных реликтов предшествующих эпох развития, доживших до наших дней. Вот почему современный Дьяковский лес может стать интереснейшим объектом для ретроспективного анализа, чтение и расшифровка ландшафтной «памяти» которого, возможно, прольет свет на ряд дискуссионных вопросов. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 07-05-00420а.

Литература

1. Тарасов А.О., Горин В.И. // Ботан. журн. 1986. Т.71. №12. С.1689—1691.
2. Худяков И.И. // Ботан. журн. 1945. Т.30. №6. С.279—280.
3. Вельмовский П.В. Антропогенные изменения структуры островных лесов Заволжско-Уральского субрегиона // Современная динамика компонентов экосистем пустынно-степных районов России. М., 2001. С.100—106.
4. Виленский Д.Г. // Изв. Саратовской обл. с.-х. опытной станции. 1918. Т.1. Вып.2. С.1—12.
5. Волчанецкий И.Б., Яльцев Н.П. // Уч. зап. Саратовского гос. ун-та. 1934. Т.11. Вып.1. С.63—93.
6. Груздев В.В. // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1955. Т.25. С.239—254.
7. Опарин М.Л., Опарина О.С., Трофимова Л.С. Динамика орнитокомплексов кампофилов подзоны сухих степей Заволжья // Современная динамика компонентов экосистем пустынно-степных районов России. М., 2001. С.129—140.
8. Тихонов И.А., Ковальская Ю.М., Богомолов П.Л. и др. Разнообразие мелких млекопитающих степи, лугов, полей и залежей в окрестностях с.Дьяковка (Саратовская область) // Современная динамика компонентов экосистем пустынно-степных районов России. М., 2001. С.164—168.
9. Цветкова А.А., Опарин М.Л., Опарина О.С. Зимнее распространение и численность землероек в Саратовском Поволжье // Млекопитающие как компонент аридных экосистем (ресурсы, фауна, экология, медицинское значение и охрана). Тез. Межд. совещ. М., 2004. С.160—161.
10. Неронов В.В. // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 2005. Т.110. Вып.4. С.34—40.
11. Щитанов Н.А., Булатова Н.Ш., Опарин М.Л. // Докл. РАН. 2002. Т.386. Вып.3. С.427—429.
12. Орлов Е.И. Желтый суслик // Мат-лы к познанию фауны Нижнего Поволжья. Вып.4. Саратов, 1929. С.3—12.
13. Проект внутривидового охотустройства Дьяковского государственного заказника. М., 1991.
14. Груздев В.В., Солдатова А.Н., Бочарова О.М. // Зоол. журн. 1957. Т.36. Вып.9. С.1424—1426.

Звери подземелья

И.Ю.Попов,
кандидат биологических наук
Д.Н.Ковалев
А.Н.Островский,
доктор биологических наук
Санкт-Петербургский государственный университет

Десятки маленьких зверьков разместились на живописных сводах пещеры. Сразу за входом на стене в гордом одиночестве сидел пушистый северный кожанок (*Eptesicus nilssonii*), привлечший наше внимание довольно ярким коричневым мехом с желтоватым налетом. Бурые ушаны (*Plectous auritus*) висели на стенах и сводах поодиночке, спрятав огромные уши подмышками. Крупные прудовые ночницы (*Myotis dasycneme*) скапливались эффектными гроздьями по 20–30 штук, стараясь пристроиться как можно ближе к потолку. Маленькие водяные ночницы (*M. daubentonii*) размещались на стенах по одной или небольшими группами. Присмотревшись, мы заметили, что в них затесались летучие мыши другого вида — усатые ночницы (*M. mystacinus*) с черными носами и ушами. Из узких трещин кое-где торчали такие же темные мордочки. Некоторые ночницы слегка шевелились и спросонья недовольно поглядывали на незваных гостей. Зрелище завораживало. Не так-то просто увидеть сотни зверей сразу поблизости от огромного, пугающе разрастающегося Санкт-Петербурга. Забравшись в пещеру, мы были почти уверены в том, что зимующих летучих мышей там давно нет, и что в глубоких щелях уцелели лишь немногие, кому особенно повезло. Что это — всплеск численности или остатки былого благополучия? Действительно ли летучие мыши ужились рядом с нами или же это только эффект первого впечатления? Обнаружив несколько сотен зверьков, мы решили разобраться в причинах и сути происходящего.



Вход в Корповскую пещеру.

Здесь и далее фото И.Ю.Попова

Летучие мыши в Ленинградской обл.

В Ленинградской обл. отмечено десять видов рукокрылых, среди которых есть перелетные и оседлые. Перелетные виды — лесной нетопырь (*Pipistrellus*

nathusii), рыжая вечерница (*Nyctalus noctula*) и двухцветный кожан (*Vespertilio murinus*) — зимуют значительно южнее. Это связано с тем, что они не выдерживают долгого охлаждения и в то же время обычно избегают пещер (где зимой сохраняется более высокая температура), предпочитая дупла деревьев, чердаки и т.п. В нашей местности такие убежища для этих видов летучих мышей слишком холодны. В пещерах Ленинградской обл. зимой встречаются ночницы (помимо упомянутых водяной, прудовой и усатой еще два



Скопление прудовых ночниц. Староладожская пещера.

вида — Брандта, *M.brandtii*, и Наттерера, *M.nattererii*), в меньших количествах — бурый ушан (*Plectous auritus*) и северный кожанок (*Eptesicus nilssonii*). Ушан может зимовать в более холодных убежищах (колодцах, небольших гротах), а северный кожанок их даже предпочитает, и если обнаруживается в больших пещерах, то непременно вблизи входа [1, 2].

Как и большинство летучих мышей, наши «пещерные» виды изящного телосложения и довольно мелких размеров: масса тела около 10 г, длина 4–6 см, размах крыльев не более 30 см. Среди них выделяется, пожалуй, лишь прудовая ночница, которая весит до 25 г при длине тела до 68 мм и размахе крыльев до 35 см. Примечательна она также тем, что может летать значительно быстрее других наших летучих мышей. Во время охоты прудовые ночницы пронесаются над поверхностью водоемов, стараясь найти большие скопления мелких насекомых и хватая их в воздухе или с поверхности воды. Примерно так же ведет се-

бя водяная ночница, но она не столь жестко связана с водоемам и нередко охотится на опушках лесов или в парках. Хватать корм с поверхности воды этим двум видам позволяет более подвижная «лапка», свободная от летательной перепонки, которая прикрепляется около голеностопного сустава. У других ночниц (Брандта, Наттерера, уса-той), численность которых у нас относительно невелика, перепонка прикрепляется к основаниям пальцев.

Что касается ушана и северного кожанка, то они считаются в нашей местности обычными и многочисленными (хотя прямых наблюдений по этому поводу не так уж много). Северных кожанков можно заметить в лесах на просеках, на опушках или вблизи населенных пунктов на относительно большой высоте. Ушан же обычно держится ближе к деревьям, и его трудно увидеть во время охоты. Полет его менее быстрый, но зато более маневренный. Кроме того, ушан обладает способностью зависать в воздухе в одной точке, вы-

искивая насекомых, которые сидят на ветвях деревьев или летают между ними.

Хотя ландшафт Ленинградской обл. никак нельзя назвать гористым, на ее территории имеется значительное количество пещер, правда, искусственного происхождения. По последним опубликованным данным, общая численность летучих мышей на зимовках области растет. В 1950-е годы в наиболее известных пещерах у пос. Саблино их было около 400, и хотя в 1970-е годы считалось, что они почти исчезли, в конце 1990-х годов в Саблинских пещерах обнаружено около 600 зверьков. Особенно порадовало сообщение о росте численности редких для нашей северной местности ночниц Наттерера — изящных созданий с розовым носом и большими светло-серыми ушами [3].

Пребывая в хорошем настроении, мы отправились в Саблино, ожидая увидеть сотни зверьков, но нас постигло разочарование: вместо шестисот мы насчитали от силы пару десятков. Местообитания летучих мышей пришли в полный упадок и стали похожими на помойки. Ничего общего с тем, что мы видели в менее посещаемых людьми пещерах. На следующий год мы с большей настойчивостью облазили все Саблинские пещеры (в том числе и те, которые ранее хироптерологами не исследовались), и с трудом обнаружили чуть больше сотни летучих мышей.

Известно, что зимующие летучие мыши нередко осваивают подвалы старых построек: к примеру, в подземных ходах одной из польских крепостей зимуют около 20 тыс. особей. Мы отправились на поиски подобных колоний — были в древней крепости Копорье, в брошенных командно-наблюдательных пунктах вокруг Луги, в большом форте Красная горка, в котором сохранились обширные подземелья. Но, к сожалению, с большим трудом удалось

найти только четырех северных кожанков. Скорее всего, в этих подземельях слишком холодно и сухо, к тому же летучие мыши избегают помоек, в которые у нас зачастую превращаются подвалы.

Летучие мыши и пещеры

Поискав в Интернете и проконсультировавшись с коллегами, мы взялись за систематический поиск летучих мышей и их зимних убежищ и в результате многочисленных поездок обнаружили в Ленинградской обл. 30 пещер. Почти все они образовались на местах добычи песка для стекольной промышленности. На определенной глубине проходит слой подходящего (уплотненного, без примесей) песка, который в XIX — начале XX в. добывали рабочие, прорывая ходы в разных направлениях. В те времена было технически трудно извлекать песок сверху, пробиваясь сквозь большой объем грунта и слои каменных плит (впоследствии песок стали добывать карьерным способом и более интенсивно). Проще всего было найти доступ к песку сбоку — со стороны крутых обрывов речных долин. В результате этой деятельности примерно на одной глубине (обычно около 10 м) по берегам некоторых рек образовались многочисленные штольни-пещеры, общая длина которых может достигать нескольких километров. План этих пещер обычно напоминает кляксу, причем в сложном переплетении пересекающихся линий иногда угадывается стремление проделать правильные параллельные и перпендикулярные ходы. Максимальное расстояние от входа до края «кляксы» достигает 250 м. Несколько пещер возникло на местах добычи строительного камня и имеет вид просторных залов, соединенных небольшими проходами. Как бы то ни было, все эти искусственные пещеры весьма напоминают естест-



Водяные ночницы. Корповская пещера.

венные и вполне пригодны для зимовок летучих мышей. Настоящих больших естественных пещер в Ленинградской обл. нет, есть лишь несколько маленьких гротов, промытых ручьями в крутых берегах рек.

Естественные пещеры — хоть и редкий, но регулярно встречающийся биотоп со специфической фауной. Некоторые пещеры населены причудливыми рыбами и насекомыми. Когда-то, не менее 60 млн лет назад, там оказались и необычные млекопитающие с перепонками и «несуразно» устроенными конечностями... Детали процесса возникновения рукокрылых с трудом поддаются пониманию, однако нет никаких сомнений, что ранние этапы их эволюции были связаны с пещерами. Об этом можно судить хотя бы по тому, что летучие мыши обладают хорошо развитой системой эхолокации, которая развивается в том случае, если животное обитает в абсолютной темноте (где нет даже лунного света) и свободно перемещается в трехмерном пространстве —

летает или плавает. Эхолокация как необходимый способ ориентации в пространстве есть у китообразных, летучих мышей и у некоторых птиц, гнездящихся в пещерах. Становление эхолокации у китообразных было связано с ориентированием и охотой в мутной воде и на большой глубине. У рукокрылых этот феномен, по-видимому, возник в связи с обитанием в пещерах и впоследствии позволил им эффективно охотиться по ночам. Способность к эхолокации может появиться в результате тренировки у других животных и даже у человека, но летучие мыши и китообразные в этом отношении стоят на недосягаемой высоте [4].

Летучие мыши некоторых видов сохранили тесную связь с пещерами, и поэтому для понимания их биологии нужно рассматривать подземные убежища не как краткое и вынужденное их местообитание, а как естественную среду, в которой они проводят большую часть жизни. Не надо думать, что летучие мыши в пещерах и других



Ушан. Корповская пещера.

подобных укрытиях только сидят в оцепенении. Их зимняя спячка и дневной сон не такие уж и глубокие. Они общаются, ползают, иногда взлетают поразмяться, выясняют отношения, спариваются. В нашей местности значительная часть летучих мышей спаривается именно во время зимовки, поэтому благополучное состояние зимних убежищ исключительно важно для сохранения и увеличения их численности [5].

В Ленинградской обл. человек сделал рукокрылым подарок — выкопал пещеры, похожие на естественные, но вскоре

начал его «отбирать» — беспокоить во время зимнего сна. Летучие мыши просыпаются несколько раз за зиму, но если будить их слишком часто, они потратят слишком много энергии, которую зимой восполнить нечем, и могут умереть от истощения. Случалось и прямое истребление: житель из пос. Саблино поделился воспоминаниями о том, как в голодное послеперестроечное время пытался продавать мышей в качестве сувениров. Говорят, и сейчас их потихоньку продают на птичьем рынке, хотя непонятно, кому нужен такой домашний любимец,

который целый день спит и, скорее всего, в неволе погибнет.

Люди и пещеры

Некоторые представители нашего вида испытывают влечение к пещерам, которое авторам этих строк показалось весьма специфическим. Есть некий слой общества — спелестологи, которые занимают промежуточное звено между диггерами, путешествующими по подземным туннелям городов, и спелеологами, исследующими настоящие пещеры. Спелестологи-профес-



Северный кожанок. Пещера на р.Долгой.

сионалы занимаются историей и картированием искусственных подземных сооружений, поиском заваленных пещер и откапыванием входов. Составление карт искусственных пещер — дело важное, поскольку помогает в поисках заблудившихся туристов (в некоторых районах это весьма актуально). Спелестологи-любители лезут под землю за адреналином, тишиной, уединением или, наоборот, общением. У них свои обычаи, традиции и ритуалы. В пещерах они отмечают Новый год и дни рождения, справляют свадьбы. Одна из традиций —

оборудование штолен дорожными знаками и вывесками с названиями улиц. Пробираясь по тесной полуобвалившейся штольне, можно с удивлением узнать, что это, оказывается, «Фурштатская улица» (как в центре Санкт-Петербурга), а на повороте увидеть предупреждающий знак «Опасный поворот» и т.п. В больших залах эти любители подземелий сооружают «могилы» зловещего вида, на которые помещают настоящие надгробья, которые утащили с кладбищ. Интернет полон их рассказами и отчетами о путешествиях. Одни искатели при-

ключений детально описывают время и длину маршрутов, другие — явно стараются не выдать лишней информации о расположении пещер, чтобы туда не добрались конкуренты. Как ни странно, летучие мыши в этих историях практически не фигурируют.

Деятельность спелестологов-любителей, по-видимому, довольно стабильна. К примеру, в Саблине есть четкое расписание подземной активности — в пятницу вечером приезжают люди специфической наружности с фонарями на лбу и большими рюкзаками. Они забира-



Усатая ночница Брандта. Староладожская пещера.

ются на ночь в пещеры и сидят там все выходные. У каждого есть любимый угол, в котором он предаётся разнообразным увеселениям. Нам говорили, что фашиствующие организации также устраивают там свои сборища. Мы этому не очень поверили, но как-то и в самом деле увидели нарисованные на стенах знаки свастик.

Летучие мыши и люди

Оказалось, что наш первый успех не дает повода для оптимизма. Точный подсчет показал, что сейчас в пещерах Ленинградской обл. довольно многочисленны лишь два вида ночниц — прудовая (не менее 1 тыс. особей) и водяная (не менее 200), причем большая их часть обитает только в одной пещере. Но их численность в любой момент может сократиться до нуля. Саблинские пещеры служат постоянным укором и напоминанием о возможной судьбе зи-

моков. Общее состояние довольно безрадостно. На одну летучую мышь приходится десятки квадратных метров сводов, а ведь должно быть наоборот: на один метр — десятки и сотни летучих мышей. Следы пребывания любителей подземных приключений столь вопиющи, что становится очевидно — именно из-за них летучие мыши в большинстве пещер и пропали.

К сожалению, и ученые приложили к этому руку. В научных публикациях мы нашли упоминания о добыче для исследований сотен летучих мышей, при этом общая их численность во всех пещерах Ленинградской обл. вряд ли превышала 2 тыс. [2, 5, 7]. Ясно, что работа зоолога начинается со сбора коллекций, но сейчас уже не те времена, и объект в данном случае весьма уязвим. Давно пора прекратить исследования в стиле первых научных экспедиций эпохи становления зоологии.

Девиз систематики — «надо в первую очередь знать, какие

виды у нас обитают». Спорить с этим трудно, но необходимо понимать, что пока мы будем «узнавать», уже некого будет изучать. Один из нас как-то присутствовал на природоохранной конференции, где докладчик рассказывал о долгих безрезультатных поисках почти исчезнувшего вида растений. Финал доклада ознаменовался торжествующим восклицанием: «Но мы все-таки нашли его! Возможно — два последних экземпляра! Вот они!» И над трибуной поднялись два гербарных листа. Комментарии, как говорится, излишни...

Действительно, есть организмы, которые исчисляются миллионами и плодятся как кролики. Их можно добывать в умеренном количестве без всякого ущерба для существования вида. Но летучие мыши не из таких. Кроме специфических требований к условиям обитания они отличаются редким для таких небольших зверьков долгожительством — 30 лет для летучих мышей не предел (поэтому, к слову, ими весьма интересуются геронтологи). С большой продолжительностью жизни связана медленная смена поколений, а, значит, и низкие темпы увеличения численности.

Многих специалистов по рукокрылым (хироптерологов) очень занимает вопрос о видах-двойниках — усатой ночнице и ночнице Брандта. Детали строения черепа, половых органов, окраски, различия генетических маркеров дали повод разделить один вид на два. Ночницы Ленинградской обл. внесли вклад в решение задачи — несколько десятков уж точно лишились жизни [6]. Ранее это был один из самых многочисленных видов, а теперь встречаются лишь единичные экземпляры. Случайно ли это совпадение? Ушанам также досталось, правда, с ними довольно быстро разобрались. А вот дискуссии о комплексе видов «усатых ночниц Брандта» идут до сих пор.

Водяные и прудовые ночницы тоже пострадали от пытли-

вых исследователей. В 1960-е годы для выяснения сезона спаривания зоологи вскрыли несколько десятков самок каждого «пещерного» вида, уничтожив тем самым и их потомство. (Заметим, что спаривание летучих мышей на зимовках легко увидеть и нет необходимости убивать десятки животных, чтобы в этом убедиться.)

Подорвало численность летучих мышей на местах зимовок и массовое кольцевание, проведенное в 1950—1960-е годы. За несколько лет было окольцовано 2,8 тыс. особей, из которых вернулись только 370, причем в основном в первый год после кольцевания. Безусловно, учитывая консервативность летучих мышей в выборе зимовок и большую продолжительность их жизни, вернуться на зимовку должно было значительно больше животных. Исследователи отметили, что обычно летучие мыши покидали зимовки сразу после кольцевания, и что эта процедура пагубно отразилась на состоянии зимовок: большая часть окольцованных летучих мышей вскоре погибла. В одном из самых крупных скоплений в Саблинских пещерах за несколько лет такой работы численность летучих мышей сократилась в пять (!) раз.

Одновременно проводилось и множество других изысканий: летучих мышей регулярно отлавливали, взвешивали (причем не только окольцованных, но и «большие серии» других особей — 2 тыс. животных в общей сложности), участки пещер отгораживали (при этом часть летучих мышей погибала); ставили варварские эксперименты по выяснению способности летучих мышей сопротивляться холоду (животных помещали в клетку, установленную в холодном подвале, где они погибали) и т.д. [2, 5, 7]. Таким образом, за несколько лет прямо или косвенно было уничтожено более 3 тыс. летучих мышей. Резкое снижение их численности, произошедшее в 1950—1960-е



Водяная ночница (слева) и усатая ночница Брандта.

годы, в дальнейшем еще более усугубилось в результате нашествия туристов и продолжения «научных» изысканий.

Каким-то чудом у нас сохранилась большая колония прудовой ночницы, но с этим малочисленным видом есть еще одна проблема: его ареал представлен отдельными «островками» от северной Франции и Голландии до Казахстана. Между этими островками есть обширные территории, которые представляются пригодными для существования прудовых ночниц, но их там нет. Никаких закономерностей, объясняющих это, не выявлено. К примеру, в Молдове и Голландии это обычный вид, а в Германии и Польше — редкий. Общая численность оценивалась в 7 тыс. особей, хотя по некоторым расчетам прудовых ночниц может быть значительно больше — 150—200 тыс. В то же время прямыми наблюдениями это не подтверждено. При этом для большей части западно-европейских популяций прудовой ночницы зимовки вообще не найдены [8, 9]. Вполне возможно, что у нас в одной пещере зимует значительная часть представителей этого вида. И страшно думать, что малейшее увеличение потока спелео-

туристов или закрытие входа в пещеру может уничтожить эту уникальную зимовку.

В одной из пещер у пос. Саблино 10 лет назад наведен порядок — организовано туристическое предприятие, вход закрыт решеткой, мусор вывезен (ранее эта пещера называлась спелестологами Помойкой, а после «реконструкции» ей вернули старое название — Левобережная), оборудовано несколько экспозиций (муляжи кроманьонцев, добывателей песка XIX в. и др.) и организованы экскурсии. Посетив эту цивилизованную пещеру, мы сначала испытали смешанные чувства. Летучих мышей в ней стало меньше, но в соседних-то они, казалось, исчезли вовсе. Может, хоть в какой-то мере такие предприятия оправданы? Потом, после долгих трудов, мы все-таки нашли еще несколько летучих мышей в самых дальних углах других пещер и поняли, что любой чрезмерный наплыв туристов (цивилизованный или дикий) летучих мышей губит. Возможно, облагороженная пещера отвлекает внимание любителей от оставшихся пещер области и тем самым скорее полезна. Но предприятие так усиленно рекламируется, что число посетителей



Выход из пещеры на берегу Волхова.

пещер резко возросло. О Саблинто столь увлекательно пишут, что возникает ощущение какого-то земного рая — живописные водопады, горы, леса, пещеры, изобилие живности, редкие виды... На деле же это — вытоптанная местность, на которой почти не осталось деревьев, кучи мусора, плотная застройка, злые местные жители, уставшие от праздношатающейся вокруг их домов публики (у одного из них туристы как-то сожгли стог сена, и теперь он при виде очередных посетителей в традиционной российской манере очень шумно высказывает все, что по этому поводу думает)... Даже если есть желание вовлечь как можно больше народа в спелеотуризм (в чем есть большие сомнения), все равно можно было как-то учесть и интересы рукокрылых — согласовать сроки посещения пещер и продумать конструкцию решеток. В Европе накоплен соответствующий опыт и написано основательное руководство. Оно даже переведено на русский язык и размещено в Интернете [10]. Найти его — минутное дело. Но...

«Взвешенный подход», или «Shifting baselines syndrome»

Наши близкие, наблюдая, как мы зимой носимся по Ленинградской обл., размеры которой сравнимы с размерами небольшого европейского государства, часто с недоумением спрашивали: зачем вам это нужно, какая от ваших мышей польза? Можно, конечно, подвести подходящую научную базу под объяснение прямой пользы летучих мышей: они уничтожают большое количество насекомых. Есть пещерные колонии, которые удачно вписались в систему сельского хозяйства. В США в одну пещеру прилетают миллионы летучих мышей на лето, поедают вокруг насекомых, а после их возвращения в тропики в пещере остаются тонны гуано — ценного удобрения. Нам, конечно, далеко до таких масштабов, но все-таки летучие мыши занимают определенное место в сложившихся экосистемах. Любая из них стабильно существует и успешно сопротивляется неблагоприятным воздействиям

только в том случае, если ее компоненты многочисленны. Вполне возможно, что летучие мыши имеют большее значение, чем это нам сейчас кажется. Они до сих пор остаются малоизученными, в особенности в нашей стране. Но при всем при этом мы руководствовались иным — летучих мышей просто жалко. Приятно сознавать, что рядом живут необычные дикие зверьки и не вся земная поверхность превращена в поля, огороды и вырубки. Летучие мыши совершенно безобидны. Не верьте, что они так и нороят запутаться в волосах или сделать еще какую-нибудь подобную неприятность — все это выдумки. Рукокрылых вампиров в нашей местности, как и во всем Старом Свете, нет. Эта тропическая экзотика встречается только в Южной Америке и никаким образом не может случайно залететь в наши края.

Мы пытаемся что-то сделать, чтобы летучие мыши сохранились в нашей местности, и для этого собираем информацию о них. Наши исследования выполняются в рамках проекта по инвентаризации биотопов с целью организации особо охраняемых территорий. Столкнувшись с проблемой уязвимости летучих мышей, мы с удивлением обнаружили, что в России в целом этой проблемы будто и не существует. Деятельность по охране летучих мышей в нашей стране сводится к оценкам их численности на некоторых зимовках и включению ряда видов в списки охраняемых. Существующие экспертные оценки показались нам странными. В 1960-е годы в Европе утвердилось мнение об общем сокращении численности летучих мышей в результате роста антропогенного пресса. Наши специалисты это мнение считают ошибочным и предлагают «взвешенный подход» [11], что означает — не стоит преувеличивать негативные тенденции. Весь ход событий полностью следует схеме, названной на За-

паде «Shiftingbaselines syndrome» (синдромом смещения точки отсчета). Современное поколение считает благополучной ситуацию в природе, которая была во времена их детства, но это вовсе не означает, что она тогда была на самом деле благополучной. Предшествующее поколение было в той же ситуации — с грустью вспоминали о былом изобилии, которое их потомкам трудно представить. Этот синдром впервые описан для динамики уловов рыбы, но он, очевидно, распространился и на оценку «нормального» состояния фауны и флоры. В череде поколений утрачивается понимание реального положения вещей в природе и степень ее деградации. То, что есть сейчас, на самом деле — лишь остатки былого великолепия. В 1960-е годы в основном на юге страны ежегодно для изготовления наглядных

школьных пособий добывали несколько десятков тысяч летучих мышей. Их принимало от заготовителей специальное предприятие — трест «Медучпособие» [12]. Сейчас описанные колонии обычно характеризуются иными величинами — десятками и сотнями зверьков, и это кажется вполне нормальным даже хироптероологам.

* * *

Специалистов часто преследует иллюзия, что где-то есть огромные скопления животных, которые в руки исследователей еще не попали. С чего бы это? Плотность населения неуклонно растет, все проявления антропогенного пресса — тоже. В сложившейся ситуации было бы важнее тратить усилия не на поиски чего-то иллюзорного, а на сохранение уцелевшего. Несмотря на относительно высокую численность в отдельных

пещерах, летучие мыши остаются весьма уязвимыми и их общая численность сокращается. Пока мы будем обсуждать, взвешенный или не взвешенный у нас подход, можно лишиться целых популяций или даже видов. По крайней мере на обследованной нами территории еще никто не нашел больших скоплений рукокрылых за пределами наиболее известных пещер. Скорее всего, в Ленинградской обл. их больше нет. По нашему мнению, им всем (и летучим мышам, и пещерам) место в Красной книге. Полезно было бы установить строгий режим посещения пещер: полгода — туристам, полгода — летучим мышам, а точнее — полный запрет на посещение пещер в период залета мышей на зимовку (сентябрь—ноябрь) и ограничение посещений до мая. И принимать такие решения нужно как можно скорее. ■

Работа выполнена при поддержке Министерства окружающей среды Германии при участии секретариата Евробэтс (UNEP/EUROBATS) и Российско-финляндского проекта «ГЭП-анализ на Северо-Западе России», а также Западного центра координации исследований и охраны летучих мышей Музея естественной истории (Женева).

Литература

1. Новиков Г.А., Айрапетьянц А.Э., Пукинский Ю.Б. и др. Звери Ленинградской области. Л., 1970.
2. Стрелков П.П. Материалы по зимовкам летучих мышей в европейской части СССР // Труды Зоол. ин-та АН СССР. 1958. Т.25. С.255—303.
3. Чистяков Д.В. // Вестник СПбГУ. 1999. Сер.3. Вып.1. №3. С.41—47.
4. Роров И. // Ludus Vitalis. 2005. V.XIII. №29. P.3—19.
5. Стрелков П.П. // Труды Зоол. ин-та АН СССР. 1971. Т.48. С.251—303.
6. Стрелков П.П., Бунтова Е.Г. // Зоол. журн. 1982. Т.LXI. Вып.8. С.1227—1242.
7. Стрелков П.П. Опыт кольцевания рукокрылых в зимних убежищах // Материалы первого всесоюзного совещания по рукокрылым. Л., 1974. С.21—30.
8. Horáček I., Hanák V. Distributional Status of *Myotis dasycneme* // European Bat Research 1987 / Ed. V.Hanák, I.Horáček, J.Gaisler. Praha, 1989. P.565—590.
9. Limpens H.J.G.A., Lina P.H.C., Hutson A.M. Action Plan for the Conservation of the Pond Bat in Europe (*Myotis dasycneme*) // Council of Europe. Nature and Environment. 2000. №108.
10. Митчелл-Джонс А.Дж., Бихари З., Мазинг М., Родригес Л. Подземные убежища рукокрылых: охрана и управление. EUROBATS Publication Series №2, 2007 / Пер. с англ.: С.В.Газарян, Е.В.Годлевская.
11. Кожурина Е.И., Стрелков П.П. Редкие виды рукокрылых фауны бывшего СССР и России // Редкие виды млекопитающих России и сопредельных территорий / Ред. А.А.Аристов. М., 1999. С.168—187.
12. Стрелков П.П. Проблемы охраны рукокрылых // Материалы первого всесоюзного совещания по рукокрылым. Л., 1974. С.49—55.

Еще раз о Дарвине

К.В.Макаров

Московский педагогический государственный университет

Эволюционная теория Дарвина, увидевшая свет 150 лет назад и встреченная весьма неоднозначно, до сих пор многих не оставляет равнодушными. И сегодня упоминание Дарвина и дарвинизма вызывает порой самые разные реакции — от вполне восторженных до резко критических. А выражения «отбор наиболее приспособленных» и «выживание сильнейших» в обывденном сознании считаются почти синонимами, квинтэссенцией дарвинизма и эксплуатируются самым причудливым образом. В чем причина такой популярности дарвинизма и столь разных его оценок?

Однозначно ответить на такой вопрос, пожалуй, нельзя. Начать стоит с предыстории, помня о том, что любая реконструкция прошедших событий приблизительно. В первой половине XIX в. благодаря развитию типографского дела, популярности натурфилософии и публичному диспуту Ж.Кювье и Э.Жоффруа представление о том, что жизнь как-то зарождалась и развивалась, стало темой для разговоров образованной части населения. Кроме того, все развитие европейского общества и технический прогресс наглядно иллюстрировали торжество рационального мышления. Благодаря этому взгляды на эволюцию обсуждались просвещенной публикой (разумеется, отнюдь не всей) довольно широко и преимущественно с позиций логики. Хорошим при-

мером тому служит поэма Эрма Дарвина (деда Ч.Дарвина) «Храм Природы», содержание которой говорит само за себя: песня первая — «Происхождение жизни», песня вторая — «Воспроизведение жизни», песня третья — «Развитие ума», песня четвертая — «О добре и зле». Не менее красноречивы и подзаголовки песен: «Жизнь началась под океаном», «Самопроизвольно зарождение мельчайших животных», «Растения и животные совершенствуются путем воспроизведения», «Все произошло из микроскопических животных», «Выход животных из океана», «Жизнь быстро прекращается, рождение и смерть чередуются», «Скалы и горы созданы прошедшей жизнью».

Понятно, что при таком общественном сознании появление теорий эволюции — вопрос недолгого времени. В череде представлений о естественном развитии жизни учение Дарвина было не первым, но оно стало первой успешной, широко распространенной и обсуждаемой теорией. В чем причина этого? Ответ можно найти в составленной Дарвином автобиографии «Воспоминания о развитии моего ума и характера». Внимательное чтение дает неожиданный результат — вместо хрестоматийного образа серьезного пытливого ученого перед нами предстает вполне средний школьник, а впоследствии — молодой человек, живо интересующийся охотой, собиранием насекомых, коллекционированием птичьих яиц и совершенно не помышляющий о большой науке. «Помню, что в простоте своей я был поражен тем, почему каждый джентль-

мен не становится орнитологом» (с.61)*.

Молодой Дарвин дважды пытался получить высшее образование — оба раза не по своей воле и оба раза не преуспел. Правда, он участвовал в работе Плиниевского студенческого естественно-научного общества и даже сделал доклад «On the Ova of the *Flustra*», в котором сообщил: то, что считалось яйцами мшанок рода *Flustra*, — на самом деле личинки с ресничным эпителием. В целом на этом этапе жизни Дарвин выглядит скорее как натуралист-любитель, увлекающийся коллекционер: «Но ни одному занятию не предавался я в Кембридже даже приблизительно с такой страстью, ничто не доставляло мне такого удовольствия, как коллекционирование жуков. Это была именно одна лишь страсть к коллекционированию, так как я не анатомировал их, редко сверял их внешние признаки с опубликованными описаниями, а названия их устанавливал как попало. <...> Никогда ни один поэт не испытывал при виде первого напечатанного стихотворения большего восторга, чем я, когда увидел в книге Стивена «*Illustration of British Insects*» магические слова: «пойман Ч.Дарвином, эсквайром» (с.78, 79).

Этот образ Дарвина, охотника и натуралиста, не соответствует привычному. Например, в учебнике по биологии можно прочесть: «Во время обучения в университетах Эдинбурга и Кембриджа Дарвин получил глу-

* Здесь и далее, кроме специально оговоренных случаев, цитаты приводятся по изданию: Дарвин Ч. Воспоминания о развитии моего ума и характера. М., 1957.

© Макаров К.В., 2009

Третий номер журнала «Природа» был посвящен 200-летию со дня рождения Ч.Дарвина и 150-летию первого издания «Происхождения видов...».

бокие знания в области зоологии, ботаники и геологии. <...> Решающим поворотом в его судьбе стало кругосветное путешествие на корабле «Бигл»*.

Сам же Дарвин пишет о своем образовании совсем иначе: «...я посещал лекции профессора Джемсона по геологии и зоологии, но они были невероятно скучны. Единственным результатом того впечатления, которое они произвели на меня, было решение никогда, пока я буду жив, не читать книг по геологии и вообще не заниматься этой наукой» (с.69)**.

«Три года, проведенные мною в Кембридже, были — в отношении академических занятий — настолько же полностью затрачены впустую, как и годы, проведенные в Эдинбурге и в школе... время, которое я провел в Кембридже, было всерьез потеряно, и даже хуже, чем потеряно. Моя страсть к ружейной стрельбе и охоте, а если это удавалось осуществить, то — к прогулкам верхом приехала меня в кружок любителей спорта, среди которых было несколько молодых людей не очень высокой нравственности» (с.74, 76)***.

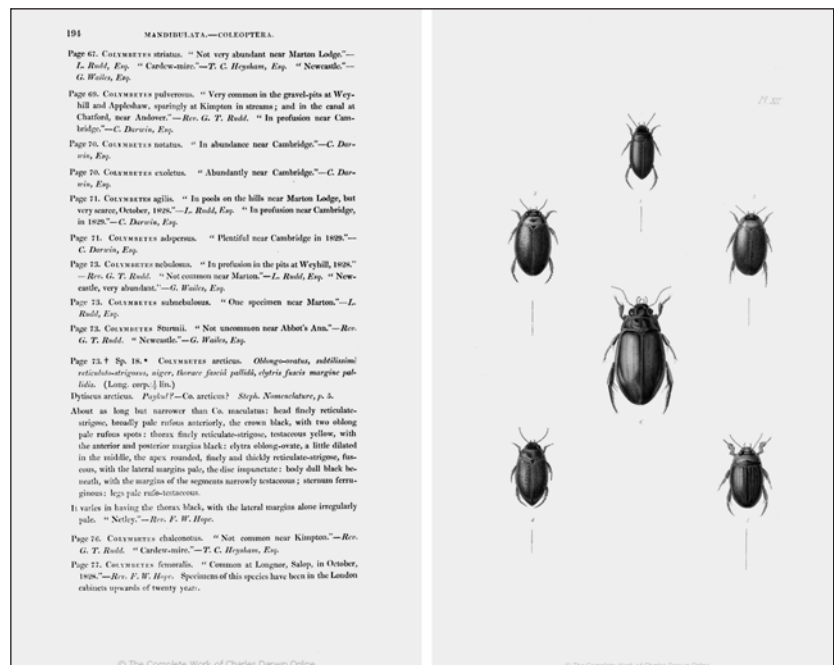
Стало быть, говорить о **глубоком** университетском образовании Дарвина «в области зоологии, ботаники и геологии» не приходится.

А в таком случае — за какие заслуги Дарвина взяли в кругосветное путешествие, да еще на

* Беляев Д.К. и др. Общая биология. Учебник для 10–11 классов общеобразовательных учреждений. М., 2002.

** Это относится ко времени обучения на медицинском факультете Эдинбургского университета, где в 1825 г. он прослушал лекции по химии, фармации, анатомии, физиологии и патологии человека; курс естественной истории профессора Джемсона слушал только в ноябре—декабре 1826 г.

*** В Колледже Христа (Кембридж) Дарвин обучался с начала 1828 г., предполагая стать священником. На рубеже 1830/31 гг. успешно сдал экзамены на бакалавра искусств — греческий, латынь, алгебру, геометрию и основы богословия.



Страницы из книги J.Stephens «Illustration of British Insects» (1829).

Иллюстрация с сайта «The Complete Work of Charles Darwin Online»

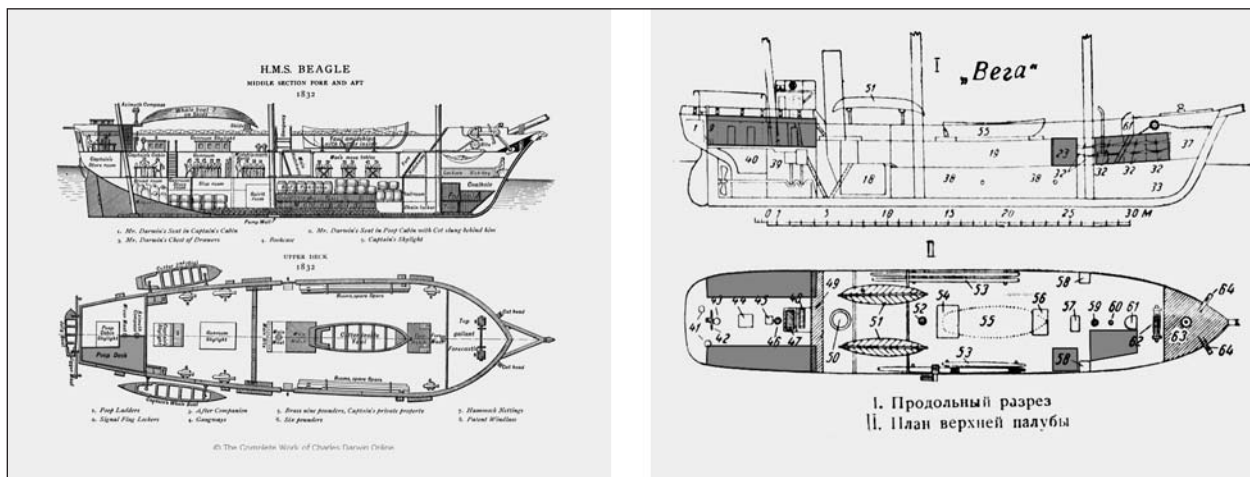
военном бригае, не приспособленном для научной работы? Воспоминания современников свидетельствуют, что Дарвин попал в эту экспедицию потому, что никто из признанных ученых не согласился участвовать в поездке. По сути, это была частная инициатива капитана Р.Фицроя, который плыл на «Бигле» второй раз. Во время первого похода капитан П.Сток покончил с собой, после чего командование перешло к Фицрою, тогда еще лейтенанту. У Фицроя, обладавшего сложным характером, были все основания опасаться аналогичного исхода, и, можно думать, он заранее озаботился поиском компаньона и собеседника. Как вспоминал Дарвин, Фицрой был согласен уступить часть своей каюты молодому человеку, который отправился бы бесплатно на «Бигле» в качестве натуралиста.

Экипаж «Бигла» состоял в основном из военных моряков: кроме капитана в него входили 12 офицеров, боцман, 42 матроса и восемь юнг. Без зачисления на довольствие, т.е. по сути —

неофициально****, на нем плыли инструментальный мастер Дж.Стеббинг, художник и чертежник О.Эрл (которого ввиду его болезни в Монтевидео сменил Ч.Мартенс), миссионер Р.Маттьюс, Ч.Дарвин и, наконец, три огнеземельца, вывезенные Фицроем в Англию во время предыдущей экспедиции и теперь возвращавшиеся на родину. Работал Дарвин в кормовой каюте, служившей одновременно и чертежной (приглашенный биолог не имел помещения для работы). Здесь он читал, писал, анатомировал и разбирал собранные материалы, здесь же спал в гамаке. Обедал Дарвин с Фицроем в капитанской каюте.

Трудно судить, как жилось молодому натуралисту в таких условиях. Тем не менее он собирал научную коллекцию, описывал геологические разрезы и т.п. Четыре года почти автономной работы и самообразования (преимущественно в сфере геологии) сформировали из натуралиста-любителя исключитель-

**** Дарвину путешествие оплатил отец.



Слева — бриг «Бигл» (водоизмещение 235 т), справа — исследовательская шхуна «Вега» (водоизмещение 290 т). Серым цветом выделены помещения, предназначенные для ученых и научной работы. Схема «Бигла» приводится по иллюстрации с сайта «The Complete Work of Charles Darwin Online», «Веги» — по книге: Норденшельд А.Е. Плавание на «Веге». Л., 1936.

но тщательно работающего и очень продуктивного ученого.

«Первые два года [путешествия на «Бигле»] страсть к охоте сохранялась во мне почти во всей своей силе, и я сам охотился на всех птиц и зверей, необходимых для моей коллекции, но понемногу я стал все чаще отдавать ружье своему слуге и наконец вовсе отдал ему, так как охота мешала моей работе. Я обнаружил, правда — бессознательно и постепенно, что удовольствие, доставляемое наблюдением и работой мысли, несравненно выше того, которое доставляют какие-либо технические умения или спорт» (с.92).

«Я всегда сознавал, что обязан этому путешествию первым истинным воспитанием или дисциплиной своего ума. <...> Всего важнее было изучение геологии посещаемых мною стран, потому что при этого рода исследованиях открывается полный простор для мыслительной способности. <...> Все мои мысли, все мое чтение неизменно были приурочены к тому, что я видел или собирался увидеть, и этот умственный навык поддерживался в течение пяти лет».

Эта четырехлетняя «эволюция Дарвина» дала замечатель-

ный результат. По возвращении из плавания в течение первого же года он издает три научные работы (в том числе весьма объемистый «Дневник путешествия...») и делает не менее двух больших докладов.

Историки науки ведут давний спор о том, когда именно Дарвин сформулировал основные положения теории естественного отбора, в каких записных книжках они изложены точнее и т.п. (об этом можно прочитать в мартовском номере «Природы»). Для нашего обсуждения это не так уж и важно. Отсутствие у молодого Дарвина узкой научной специализации в сочетании с наблюдательностью и здравым умом позволили ему увидеть более или менее полные и плавные ряды нарастания приспособлений к тем или иным условиям жизни, а изучение геологии дало редкую по тем временам возможность связать степень различия с длительностью существования видов и их местообитаний. Собственно, именно это и стало основой представлений Дарвина об эволюции: различие видов обусловлено средой их обитания и постепенно увеличивается с течением времени. Изменение видов воспринималось им

как процесс (причем относительно медленный и постепенный в геологическом масштабе времени), причины которого следует выяснить.

То, что мы называем сегодня дарвиновской теорией эволюции, появилось в результате следующего неторопливого и многоступенчатого обдумывания. Работа по созданию этой теории строилась довольно своеобразно. Дарвин, воочию видевший признаки постепенного изменения видов, старается собрать все доступные ему сведения об этих «трансмутациях» животных и растений: «...у меня появилась мысль, что, собирая все факты, которые имеют хотя бы малейшее отношение к изменению животных и растений в культурных условиях и в природе, удастся, быть может, пролить свет на всю проблему в целом... Я работал подлинно бэконским методом и, без какой бы то ни было теории, собирал в весьма обширном масштабе факты...» (с.128). Естественно, что в XIX в. документированные наблюдения такого рода были ограничены почти исключительно селекционными работами. Так в рассуждениях об эволюции появился раздел об искусственном отборе.

Следующим фактором развития эволюционных воззрений Дарвина стала книга Т.Мальтуса «Опыт о законе народонаселения...», где наглядно показаны последствия неконтролируемого, в геометрической прогрессии, размножения при ограниченных ресурсах. Есть основания полагать, что соображения мальтузианского толка приходили на ум и Дарвину — в записных книжках есть несколько оговорок на эту тему: «Что касается вымирания, то мы легко можем видеть, что разновидность... может оказаться плохо приспособленной, а поэтому погибнет; или, с другой стороны, будучи благоприятствуема, может значительно размножиться» (с.228).

Но ясно сформулированные и подкрепленные математическими аргументами выкладки Мальтуса оказались фрагментом, завершившим мозаику эволюционных соображений и тезисов. Рассуждения Дарвина сложились в стройную логическую схему, которую можно реконструировать примерно так:

— особи размножаются в геометрической прогрессии при ограниченных средствах, что порождает соревнование;

— в условиях изменчивой среды соревнование одинаковых особей приводит только к случайной, неизбирательной, их гибели, что возвращает нас к предыдущему состоянию;

— существующая в природе изменчивость меняет результат соревнования — сохраняются те особи, которые лучше используют данные условия (борьба за существование);

— при условии наследования признаков в череде поколений большее распространение получают именно те формы, которые выигрывают в борьбе за существование, — происходит естественный отбор.

Итак, еще раз оценим хронологию: в 1831—1834 гг. Дарвин наблюдает некие факты, которые заставляют его поверить в «трансмутацию» видов.

В 1837—1838 гг. он кратко формулирует основу теории естественного отбора. А книга «Происхождение видов путем естественного отбора...» выходит в 1859 г. На что были потрачены эти 20 лет?

Неспешность развития теории объясняется явной нехваткой времени. Кроме десятков собственных публикаций — с 1836 по 1857 г. выходят 21 книга и 83 статьи по самым разным областям ботаники, зоологии и геологии — Дарвин в это время редактирует ряд объемных работ и пишет многочисленные письма. Помимо этого, он кропотливо подбирает доказательства теории. И здесь наибольшее количество фактов он черпает из деятельности человека по выведению новых пород и сортов.

Искусственный отбор, приводящий к плавному и постепенному отклонению (пропорциональному числу поколений) от исходной формы, описан и доказан во всех деталях. А вот действие в природе естественного отбора во времена Дарвина аргументировать было нечем. И он вынужден ограничиться методом аналогий: характер изменчивости и различий близких видов в природе таков, как если бы действовал отбор. Эта аналогия очевидно не полна — искусственный отбор завершается лишь созданием внутривидовых форм, но не видов. И это стало важным пунктом критики теории Дарвина.

Несмотря на столь широкую, хотя и во многом косвенную аргументацию, взгляды Дарвина об изменяемости видов встречали очень сдержанное отношение даже у ближайших знакомых. Как и в случае с Ж.Б.Ламарком, вытекающие из теории следствия противоречили не только догме церкви, но и повседневной научной практике, в особенности — систематике, опирающейся на константные различия видов. *«Даже Лайелл*

и Гукер, хотя и с интересом выслушивали меня, никогда, по-видимому, не соглашались со мной» (с.134).

Многолетнее и тщательное обдумывание аргументов и постоянная готовность к критике привели к довольно необычному соотношению объема разделов учения: собственно изложение основ теории занимает лишь около 50 страниц (примерно 14% объема книги*), из которых на долю главы «Борьба за существование...» приходится 3.1%, а на «Естественный отбор...» — 10.6%. При этом изложению исходных посылок (т.е. вопросов изменчивости и гибридизации) посвящено 22% текста, обсуждению сложных с позиций теории отбора случаев — 43%, а контраргументы на критику разного рода занимают еще 20%, причем 12% посвящено неполноте геологической летописи и, в связи с этим, — отсутствию ожидаемого числа переходных форм. Надо заметить, что именно данное обстоятельство стало одним из самых первых и до сих пор самых распространенных критических замечаний в адрес теории Дарвина.

К осени 1844 г. объем рукописи перевалил за 230 страниц, а к 1858 г. примерно утроился. Неизвестно, что опубликовал бы Дарвин в итоге (и опубликовал ли вообще), если бы не молодой натуралист А.Уоллес, работавший в 1854—1862 гг. на Малайском архипелаге и приславший зимой 1857 г. свою рукопись «О стремлении разновидностей бесконечно удаляться от первоначального типа» Дарвину — с просьбой высказать замечания и суждение о возможности публикации**. Прочтя рукопись Уоллеса, Дарвин с отчаянием узнал в ней все основные положения своей теории, причем сов-

* Оценка проведена по изданию: *Дарвин Ч. Происхождение видов. М., 1952.*

** Подробнее см.: *Голубовский М.Д. Дарвин и Уоллес: парадоксы соавторства и несогласия // Природа. 2009. №3. С.13—20.*



Страница журнала «Фигаро» (1874) с типичной карикатурой на тему «Дарвин и обезьяна».

падения порой были текстуальны. Тем не менее Дарвин высоко оценил рукопись Уоллеса и с ответственными рекомендациями переслал ее Ч.Лайеллю. Благодаря вмешательству друзей 1 июля 1858 г. на заседании Линнеевского общества были заслушаны выступления Ч.Лайелля и Дж.Гукера, зачитаны отрывки из рукописи Ч.Дарвина, его письма к А.Грею и, наконец, представлена статья А.Уоллеса «О стремлении разновидностей бесконечно удаляться от первоначального типа». В таком порядке эти материалы и опубликовали, причем более половины текста заняла статья Уоллеса. И в этой публикации работа Уоллеса, безусловно, выглядит не только более объемной, но и более продуманной и законченной — что и дает основание к бесконечным дискуссиям о приоритете.

Опубликованные в сугубо научном «Журнале трудов Линнеевского общества» положения теории Дарвина и Уоллеса вызвали довольно сдержанную и в значительной мере критическую реакцию: «Наши изданные совместно работы привлекли

очень мало внимания, и единственная заметка в печати, которую я могу припомнить, принадлежала профессору Хоутону из Дублина, приговор которого сводился к тому, что все новое в них неверно, а все верное — неново» (с.130).

Трудно сказать, как эти публикации повлияли бы на развитие биологии, но вся эта история в конечном итоге заставила Дарвина прервать бесконечное улучшение рукописи о естественном отборе и подготовить книгу к печати: «...ибо боюсь, что Лайелл оказался бы прав и я никогда не закончил моего большого труда; при моем слабом здоровье даже «Извлечение» далось мне с большим трудом; но теперь, благодарение Богу, я дошел до предпоследней главы. Мое «Извлечение» составит небольшой том в 400—500 страниц» (из письма А.Уоллесу 25 января 1859 г.*). Подготовка книги заняла 10 месяцев (плюс три месяца чтения корректур), и 24 ноября 1859 г. книга вышла в свет.

Это издание Дарвин собирался назвать «Извлечение из труда о происхождении видов...». Каково извлечение объемом в 500 страниц? А какой объем был бы у полной версии? Как бы то ни было, книга эта с полной очевидностью зафиксировала приоритет Дарвина — при тогдашней скорости обмена информацией собрать такое количество разнородных фактов и подготовить публикацию за 10 месяцев было совершенно невозможно. Это прекрасно понимали все, в том числе и Уоллес, почти восторженно признавший Дарвина автором теории и предложивший позднее термин «дарвинизм».

Судьба «Извлечения», по настоянию издателя получившего название «Происхождение видов и разновидностей путем естественного отбора, или сохранение благоприятствуемых пород в борьбе за существова-

ние», разительно отличалась от судьбы заметок, опубликованных в «Журнале трудов Линнеевского общества». Весь первый тираж книги (1250 экз.) распродали за один день. Менее чем через полтора месяца (7 января 1860 г.) вышло второе издание (3000 экз.), в декабре того же года — третье (еще 2000 экз.). Итого — более 6 тыс. Много это или мало для середины XIX в.? Для сравнения: путевые дневники Дарвина и «Дневник путешествия» (книга в значительной мере популярная) за 10 лет вышли тиражом 4100 экз.. Непропорциональный успех** «Происхождения видов...», конечно, определялся и ясностью изложения, и точностью аргументации Дарвина, и подготовленностью общественного сознания.

Но был еще один фактор — за два дня до выхода тиража Лондон наводнили листовки, в которых обещалось, что новая книга откроет тайну происхождения человека. Это, мягко выражаясь, было не точно. Во-первых, читавшие журнальный вариант знали: о происхождении человека там ничего не говорится. Во-вторых, и в книге есть лишь фраза, что благодаря данной теории «будет пролит свет на происхождение человека и его историю». «Однако выставить напоказ свои убеждения в вопросе о происхождении человека, не приведя никаких доказательств, было бы бесполезно, а для успеха книги даже и вредно» (с.141).

Благодаря такой рекламной акции коммерческий успех был достигнут, но в сознании масс образовался прочный ассоциативный ряд: Дарвин—человек—обезьяна. И средства массовой информации всемерно распространяли именно эту частность, никак не отражающую собственно теории. Именно эта деталь стала пунктом самой разнобразной, острой и нередко

* Цит. по: Дарвин Ч. Избранные письма. М., 1950. С.106.

** К 1876 г. общий тираж книги составил 16,5 тыс. экз.

довольно грубой критики Дарвина, его теории и последователей. Например, Дж.Седжвик, один из учителей Дарвина, так закончил одно из своих писем к нему: «Ныне — один из потомков обезьяны, в прошлом — ваш старый друг». Книгу же «Происхождение человека...», вышедшую значительно позже, в 1871 г., читающая публика восприняла спокойно-одобрительно. Острота дискуссий уже спала, тема не поражала новизной — все уже знали, что человек произошел от обезьяны.

В связи с этим отдельного внимания заслуживают взаимоотношения Дарвина, веры и церкви. Конечно, вторая половина XIX в. — не Средние века. Дарвина не прокляли, не отлучили от церкви, не лишили звания бакалавра. Более того, он оставался католиком и прах его мирно покоится в Вестминстерском аббатстве. В «Автобиографии» Дарвин довольно много рассуждает о вопросах веры и своего отношения к ней. При всей осторожности формулировок основная мысль здесь выражена ясно: вера существует только благодаря недостатку знаний. Чем больше узнает человек, тем меньше у него оснований для веры в Создателя. Для себя однозначно определить — верить или нет — Дарвин не смог. Не хватило данных. *«Тайна начала всех вещей неразрешима для нас, и что касается меня, то я должен удовольствоваться тем, что остаюсь Агностиком»* (с.105).

Прямых столкновений с официальной церковью у Дарвина не было. На единственном публичном диспуте, во время съезда Британской ассоциации наук 30 июня 1860 г., с епископом Вильберфорсом полемизировал Т.Гексли, а не Дарвин. Но вот почта... Каждый день он получал десятки писем и отвечал почти на все; нередко корреспонденты

(и домохозяйки, и неведомые ныне студенты) задавали ему трудные вопросы о вере, о Боге и о разуме.

Подводя итоги, можно сказать, что одна из причин популярности теории Дарвина — возможность рационально объяснить происхождение нас самих. Именно поэтому она, вошедшая в школьные учебники, до сих пор не оставляет многих равнодушными. Регулярно возникают «обезьяньи процессы» (последний — дело М.Шрайбер, 2006 г.). К юбилею Дарвина сразу два телеканала взялись за создание фильма о нем. На РТР проект почти провалился — разумно мыслящий сценарист отказался участвовать в «креативных» начинаниях, поэтому 12 февраля 2009 г. показали усеченный вариант — документальный фильм «Обвиняется Чарльз Дарвин», который еще до выхода вынудил ученых обратиться с открытым письмом и предостеречь от пропаганды лженауки и мракобесия. Не берусь вообразить, что подумали зрители, никогда не читавшие работ Дарвина и не представляющие деталей его биографии. Вот пример: в передаче было сказано, что Фицрой много лет пытался убедить Дарвина отказаться от «ложной и вредной» теории и, не в силах защитить свои религиозные убеждения, покончил с собой. Фицрой, действительно, не разделял взглядов Дарвина и, действительно, совершил самоубийство. Но: перед тем он растратил все свое состояние и был помещен в психиатрическую лечебницу. Такая пропущенная в передаче деталь, пожалуй, меняет всю оценку эпизода. Но много ли зрителей знали об этой подробности? Тут уместно вспомнить тривиальное «знание — сила». К сожалению, в нынешних условиях правильное сказать «незнание — сила». Причем гораздо большая. Именно на незнании аудитории строится



В наше время карикатурные изображения Дарвина в виде обезьяны используют в рекламе.

подавляющее большинство антиэволюционных, да и антидарвинских публикаций и выступлений. И в них, не стесняясь, говорят и пишут, что теория эволюции ошибочна, что дарвинисты искажают и подтасовывают факты, что наука приходит к признанию истинности Библии и т.п. А людей сведущих, способных аргументированно возразить, — мало. И голос их нелегко услышать.

P.S. Если бы Дарвин не отправился в кругосветное плавание, гипотезу естественного отбора сформулировал бы Уоллес. Если бы Уоллес, как и собирався, стал часовых дел мастером — можно думать, что аналогичную теорию предложил бы кто-нибудь из последователей Г.Спенсера. Однако в обоих документированных случаях катализатором обобщения оказались работы Мальгуса, написанные им в продолжение спора с собственным отцом. Был ли Мальгус исторической необходимостью? ■

Кто первым нажал советскую «атомную кнопку»?

По воспоминаниям Сергея Львовича Давыдова

И.С.Дровеников

Истории иногда везет на свидетелей. Чтобы убедиться в этом, достаточно было видеть Сергея Львовича за работой. Слышать его телефонные переговоры. Удивляться досадливым жестам и почти отчаянному «ну все путают!» Дело в том, что вот уже много лет он собирает воспоминания сослуживцев, участников советского атомного проекта. Тому есть основания. Ведь дважды лауреат Государственных премий С.Л.Давыдов после продолжительной службы на Семипалатинском полигоне работал в аппарате Министерства обороны, а затем во Всесоюзном научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, и жизнью ему было назначено стать свидетелем и участником многих памятных событий.

Достаточно сказать, что именно он первым в нашей стране нажал пресловутую «атомную кнопку». Да, судьбе было угодно, чтобы 29 августа 1949 г. место за пультом подрыва первого советского ядерного заряда РДС-1 занял не Игорь Васильевич Курчатов, как намечалось, а безвестный майор Давыдов. Поиски ответа на вопрос, каким образом это произошло, и привели к нему, оставив на память о встречах в 2001—2009 гг. предлагаемые вниманию читателей записки.



Игорь Семенович Дровеников, старший научный сотрудник сектора истории физики и механики Института истории естествознания и техники им.С.И.Вавилова РАН. Сфера научных интересов — история физики во взаимодействии ее фундаментальных и прикладных аспектов. С 1993 г. участвует в междисциплинарных исследованиях по истории создания ядерного оружия, соорганизатор ряда научных симпозиумов и семинаров в этой области.

Разматывая вместе с Сергеем Львовичем нить воспоминаний, мы надеемся еще раз пройти путем, отдаленным от нас более чем на полвека. На этот раз маршрут указан словами, произнесенными от первого лица, а не казенным языком документов, скрывающих порой не только детали событий, но и причины, направлявшие их ход в то русло, которое мы зовем историей.

Сквозь оказии устной речи иногда проступает нечто большее, чем неточности и оговорки, поэтому не хочется перебивать рассказчика даже тогда, когда налицо пристрастность оценок, обусловленных межведомственными трениями и столкновением характеров, полагая, что лучше оставить свидетельство таким, как есть, не отгораживая его от читателя ни редакторским рвением, ни частотолом комментариев. Наградой будет стенографическая достоверность доверительной беседы.

Но достаточно вводить замечаний. Не пора ли, наконец, оставить читателя наедине с рассказчиком...

— Родился? Родился я за полтора месяца до Великой Октябрьской социалистической революции, 9 сентября по старому стилю. Отец мой потомственный дворянин. Конечно, он не имел никаких поместий, а вышел из среды дворян-служащих. Его отец, мой дед, был крупный чиновник Министерства путей сообщения, знал мно-

го языков, имел круг общения с культурными людьми. Отец все это растерял и перебивался с одной работы на другую, а в 16-м году женился на моей матери. Мать у меня — из мещанской семьи, в девичестве Мачехина.

В метрике о моем рождении было записано, что я сын потомственного дворянина Льва Григорьевича Давыдова и мещанки города Санкт-Петербурга Анны Васильевны Давыдовой. Когда через два года родился мой брат и ему выдали документ уже советского производства, мама как-то сумела мою метрику выправить на советскую.

И вот по этому псевдодокументу я и прожил всю остальную жизнь. Почему до меня не добрались органы, до сих пор не знаю. Проверяли меня очень много. Проверяли, когда я вступал в комсомол, проверяли, когда я вступал в партию, проверяли, когда брали на полигон, проверяли, когда брали в Министерство обороны на особо секретную работу. По всей видимости, органы действовали в основном по информации доносчиков, а доносчиков вокруг меня, по счастью, не оказалось. Но это, так сказать, предположение.

Перевернем страницы биографии, связанные с детством и юностью нашего проводника в историческом экскурсе, упомянув лишь, что в десятилетнем возрасте он прервал по настоянию матери домашнее образование, дававшееся отцом, и был отдан сразу в третий класс 72-й единой трудовой школы г. Ленинграда. Затем его обучение было продолжено в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта, Ленинградском электротехническом институте инженеров сигнализации и связи и, наконец, в Военной электротехнической академии связи. После ее окончания Давыдов преподавал радиотехнику в Ленинградском военном училище связи вплоть до мая 1948 г., когда был отозван в Москву. Там, в Хамовнических казармах, молодой инженер-связист должен был получить предписание для дальнейшего прохождения воинской службы. Но все по порядку...

— В Хамовниках я узнал, что мне надо поехать в Институт химической физики Академии наук, встретить там полковника [Б.М.] Малютова и узнать свою дальнейшую судьбу. Что такое Институт химической физики, я не знал. Ехать, сказали мне, надо по Воробьевскому шоссе до остановки «Музей народов СССР». Что за Музей народов СССР, я тоже не знал. Тем не менее поехал. Доехал. Ищу. Поднялся в горку, прошел через ворота в барскую усадьбу. Никакой вывески — ничего нет. Прошел в вестибюль здания, перед которым была раскинута колоссальная клумба роз. Занимался этими розами, говорят, сам директор института академик Семенов Николай Николаевич.

Ну вот, пройдя в вестибюль, сел и стал ждать. Обратил внимание на то, что у дверей стоят ох-

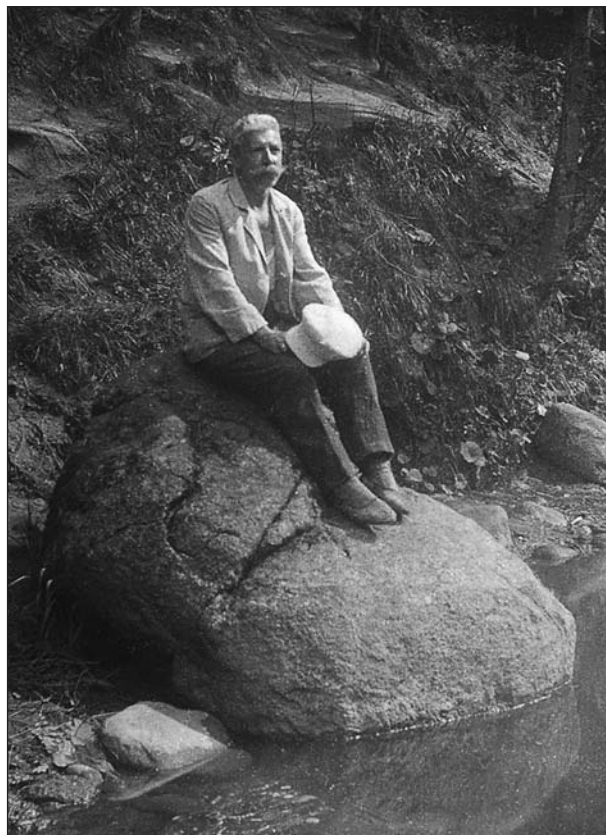


Институт химической физики АН СССР, куда в 1948 г. был прикомандирован С.Л. Давыдов.

ранники. Это были молодые парни в пиджаках, полы которых оттопыривались сзади. По всей видимости, там было оружие. Они каждого входящего проверяли по пропускам. Ждать мне пришлось недолго. Дверь с шумом распахнулась, и в вестибюль вошел невысокого роста плотный человек, полковник, за ним еще полковник. Я сообразил, что один из них и есть тот, к кому мне нужно. Представился, что вот прибыл в его распоряжение. Малютов сразу же определил меня старшим научным сотрудником в отдел автоматики и электротехники. Сказано — сделано. На том и расстались.

Примерно в конце месяца [июль 1948 г.] обнаружилось, что меня назначают на работу в лабораторию Георгия Львовича Шнирмана, который в то время занимался разработкой и изготовлением программного автомата. Для чего он был нужен — программный автомат, — мне никто ничего не говорил. Познакомили с наметками схемы, ну и начал я «втягиваться».

Потом постепенно проясняется, что это, оказывается, программный автомат для включения аппаратуры Опытного поля, на котором должен производиться атомный взрыв. Но все постепенно, шажками, никто прямо этого не сказал. С работой я освоился быстро, а секрет заключался в том, что она была мне близка. Я все же три года проучился в путейском институте на факультете сигнализации, а там как раз все строилось на релейных схемах. То есть я оказался наиболее подготовленным к участию в создании программного автомата. Вскоре я стал даже поправлять Шнирмана, корректировать его.



Анна Васильевна и Лев Григорьевич, мать и отец Давыдова.

Однако как создавался программный автомат и насколько верны слухи, что в нем использовались трофейные реле с Фау-2?

— Георгий Львович Шнирман занимался разработкой всей системы автоматического включения аппаратуры приборов поля. Для того чтобы я мог «включиться», Шнирману пришлось, не говоря мне ничего про атомный взрыв, рассказать, как строилась на полигоне система. Вкратце она состояла в том, что было выбрано Опытное поле — площадка на полигоне 20 километров диаметром — совершенно ровное блюдце, окруженное невысокими сопками по периметру. В центре этого поля ставилась башня, на которой должен был быть взорван атомный заряд, а по радиусам выстраивались сооружения, в которых размещались измерительные приборы. Всего таких сооружений 16 штук. Семнадцатым приборным сооружением был командный пункт, который располагался к востоку, в 10 километрах от башни. Вот на этом командном пункте и должен был находиться командный прибор для запуска всех остальных.

Когда я пришел, Шнирман уже был занят разработкой этого прибора, программного автомата, который должен был определенным образом вы-

дать сигнал на подрыв. За секунду выдать сигнал на включение одних приборов, за 10 минут — других и т.д.

Программный автомат должен был быть абсолютно надежным. Атомный заряд — единственный, и было недопустимо, чтобы программный автомат вдруг не подорвал его. Должен сказать, что Шнирман и я, уже включившись в эту работу, сказали, что мы не можем сделать такой программный автомат, если он не будет сам выдавать команд на подрыв ядерного заряда. Для того чтобы включить приборы за секунду, надо было знать, когда произойдет взрыв. Конструкторское бюро предполагало, что они сами будут взрывать атомную бомбу, а мы — угадывать, когда они взорвут. На командном пункте была задумана комната для конструкторского бюро, откуда они предполагали осуществить рубильником взрыв, и окошко в нашу комнату, где должен был стоять наш командный аппарат, а мы по их команде должны были его за секунду включить.

Это был первый конфликт с конструкторами. Конструкторы все хотели делать сами. Они уже горели огнем орденов и медалей золотых, мы же исходили только из технической целесообразности.

Второе. Кто должен был сидеть за программным автоматом? Мы положили, что будет сидеть

Он. Кто Он, с большой буквы? Я не знал. Шнирман, возможно, и знал, имея в виду Курчатова, но говорили мы только — «Он». Игорь Васильевич Курчатов — человек, очень любивший все делать своими руками. Как известно, первый ядерный реактор он сам запускал в 46-м году*. Так?

Вот мы думали, что он и первую бомбу взрывать будет сам, поэтому тут уже вмешался я, имея опыт по путейскому институту, вспомнил, что существуют системы на полного дурака, как говорили американцы. На самом деле это очень умная система, которая все упрощала. Решил управление программным автоматом сделать так, что, кто бы ни сел, никакой ошибки не мог допустить. То есть, если будет Курчатов, его не надо учить. Подошел: кнопка, лампочка горит — нажми! Нажал: лампочка погасла, зажглась другая — нажми другую! И все! Вот такую систему заложил уже я, придя сюда.

Далее. Раз за пультом будет сидеть Он, то, значит, и кресло должно быть для Него: бархатное, хромированное. Постамент должен быть ореховый. Оформление должно быть шикарное! Какое шикарное? Ну, Шнирман выбрал систему «трельяж», типичную для всех пунктов управления. Шкаф большой, большая передняя панель и две боковых панели несколько пониже, выступающие вперед.

Требовалось, конечно, обеспечить абсолютную надежность. А что такое надежность? Тут я предложил Шнирману свой принцип, который применялся на железных дорогах. Принцип, что всякая неисправность, какая бы ни возникла, должна выводить аппарат «в отказ». Он не должен выдавать ложных команд.

И второй критерий выбрали: сделаем систему дублированную — две одинаковых системы, работающих параллельно. Так. И надежность: чтоб любая неисправность, какая бы ни возникла во время сеанса, не должна была выводить из строя автомат. Вот это основные принципы, которые были заложены.

А реле мы применили сильноточные, привезенные из Германии. Их немцы использовали на ракетах Фау-2. Замечательные реле! Потом эти реле у нас в России скопировали, они пошли в авиацию. Вся авиация сейчас работает на этих реле, они называются РТ-20, РТ-40 и т.д.**. Замечательное реле, очень умное, но сильноточное, а раз большой ток, значит, на линии в 10 километров напряжение теряется. Пришлось делать через 10 километров пункты повторения сигнала. Это называлось ретрансляционным пунктом.

* Первый в СССР и на Европейском континенте ядерный реактор Ф-1 был пущен под руководством Курчатова группой сотрудников Лаборатории №2 АН СССР (ныне РНЦ «Курчатовский институт») 25 декабря 1946 г.

** Запрос, обращенный к специалистам по авиационному бортовому электрооборудованию, подтвердил достоверность этого утверждения.



С.Л.Давыдов — ученик ленинградской трудовой школы №72. 1933 г.

Так были заложены основы, ну а в завершение всего надо было монтировать программный автомат. А все секреты! Директор выселил своего заместителя и поместил нас по соседству со своим кабинетом.

Директор? Уж не Николая Николаевича Семенова ли имеет в виду рассказчик?

— Да. Семенов дал нам это помещение. Моментально в нашей комнате, как только мы стали работать, появился представитель МГБ, подполковник [Б.В.]Вешников. Мрачный человек. Приходил, сидел около двери на стул, с внутренней стороны. Ни слова никому: ни здравствуйте, ни до свидания. Сидит и никуда не уходит. Мы работаем — он сидит. Кого охранял: нас ли охранял или от нас охранял?

Монтируя автомат, старались придать ему замечательный вид. Покраску корпуса автомата произвели на заводе им.Лихачева***. Ручки взяли оттуда же, с машин «Победа»****. Они были очень

*** Здесь и далее имеется в виду Московский автозавод им.И.В.Сталина — ЗИС, бывший АМО, а впоследствии Московский автомобильный завод им.И.А.Лихачева, или ЗИЛ.

**** Прошедший в 1948 г. государственные испытания автомобиль «Победа» (М-20) выпускался на Горьковском автозаводе им.В.М.Молотова, известном как ГАЗ.



Слушатель Военной электротехнической академии связи.
1939 г.

оригинальные, хромированные. Много карнизов хромированных сделали на панелях. Автомат блеснул, как игрушка! Но этот самый представитель МГБ потребовал, чтобы мы на программный автомат сделали чехол и чтобы, когда мы не работаем, он находился под чехлом и его никто не видел. Сделали и чехол.

Слушая рассказ очевидца, порой трудно, как и в жизни, отделить главное от второстепенного. Вот и здесь описание доставки программного автомата на полигон не уступает, кажется, в занимательности живописанию других перипетий.

— Завершили. Нужно отправлять автомат на полигон. Но как его доставить, чтобы он не попортился? Решили — до Семипалатинска грузовым вагоном. Дальше предписали переправлять по Иртышу до полигона. А уже выгрузив у полигона, везти до Опытного поля на автомашинах со скоростью 20 километров в час.

Так мы задумали. Но жизнь внесла свои поправки. Примерно в конце 48-го года, когда надо было уже отправляться на полигон, вдруг неожиданно появляется комиссия от конструкторов, или, если хотите, от Первого Главного управления Совета Министров СССР. Возглавлял комиссию

Самвел Григорьевич Кочарянц. Членами комиссии были Комельков Владимир... [Степанович] и Чугунов Сергей Сергеевич.

Комиссия появилась в боевом настроении, заявив, что должна проинспектировать и оценить: пригоден ли программный автомат для Опытного поля. Комельков от комиссии как-то сразу отошел, занялся другими вопросами, а в комиссии остались Кочарянц и Чугунов. Большое впечатление на меня произвел Чугунов. Он сразу занял агрессивную позицию. В чем дело? Уж очень им не по душе пришлось, что мы на свой программный автомат возложили подрыв ядерного заряда. Как это? Лишить их такого финального куска работы — это для них было неприемлемо.

И вот Чугунов: «Да зачем вам на себя брать? Да вы знаете, какая это ответственность? И на кого вы эту ответственность возлагаете? На какие-то реле! Две сотни! Да еще неизвестно, как работают. Вы ставите под угрозу весь опыт. Это недопустимо!»

Надо сказать, что та комиссия запомнилось мне на всю жизнь. Это была дуэль, если можно так выразиться. Шнирман из той дуэли как-то выпал. Почему? Все схемные разработки легли на меня, и я знал всю схему назубок. Разбуди — отвечу в любой момент. Чугунов стал задавать всякие вопросы: «А вот у вас тут-то сломается, а тут-то испортится, тут замыкание, тут другое, третье». И я с ходу, без схемы, по памяти, парировал все его возражения. Арбитром в наших спорах выступал Кочарянц. И что, каков итог? Я победил! Победил, потому что комиссия написала, что автомат может быть использован для подрыва заряда и для запуска аппаратуры.

Но Чугунов как член комиссии приписал тем не менее, что программный автомат излишне сложен. Вот так он познакомился со всеми нашими принципами, которые были заложены в программный автомат: дублирования, надежности и обслуживания.

Впрочем, следя за работой комиссии, мы отвлеклись и забыли, что программный автомат в нашем повествовании еще не отбыл по месту назначения.

— Ну вот, подошло время, конец 48-го года, нужно было уезжать на полигон и отправлять туда программный автомат. Автомат упаковали в ящик. Повезли на железнодорожную станцию. И вдруг со станции звонок: ящики не входят в товарный вагон, не проходят в дверь. Паника! Моментально посылаем туда конструкторов, рабочих. Тут же на платформе пилят ящик, тут же обрезают углы, надставляют и погружают в вагон. Слава богу, автомат поехал! А за ним и мы.

По приезде на место меня назначили начальником командного пункта. Вскоре поступило сообщение: программный автомат прибыл в Семипалатинск, на перевалочную базу. Надо ехать за

автоматом. У меня и в мыслях не было, чтобы послать кого-нибудь вместо себя. Дело ответственное, сам должен ехать, хотя смело мог послать своего помощника, Денисова, был у меня такой, Иван Иванович. Добрался благополучно до Семипалатинска, разыскал базу, нашел пакгауз, посмотрел в него, груз-то секретный! Там [в Институте химфизики] у нас был даже подполковник МГБ — помните? — монтаж наш охранять, а тут, смотрю, стоят наши ящики, никто их не охраняет, стоят, никому дела нет. Стоят как общее! Как хлам! В этом самом пакгаузе...

Узнал, когда будет подана баржа для транспортировки. Сказали, что вечером. Вечером я опять оказался в пакгаузе. Действительно, подошел буксирчик, приволок баржу, появились обслуживающие ее солдаты, начали погрузку. Для того чтобы спустить на баржу автомат, а он весил несколько сотен килограммов, солдаты проложили рельсы узкоколейной железной дороги. Проложили, наверно-таки, рельсы три или четыре. Я вышел и стал наблюдать за погрузкой. Темно, маленькая лампочка над дверью пакгауза светится, тускло так. Вот стали они двигать, а я смотрю, что рельсы стали прогибаться под моим автоматом. Я закричал «Стоп!», остановил погрузку, велел подложить еще рельсы, и тут только меня осенило: а что если б я не заметил? Все бы рухнуло, весь труд, который мы заложили, все бы пропало. А ведь за такое событие в то время не поздоровилось бы ни мне, никому. Вот я и понял, почему начальники часто перекаладывают такие работы на подчиненных.

Погрузили автомат, поставили на баржу. Я тоже поместился. Был для приличия с наганом. Что меня поразило? Баржу обслуживали мужчина и женщина. Они были немые. Случайность это, не случайность — до сих пор не знаю. Баржа совершала рейс на полигон секретный, так? То ли специально были подобраны такие люди, которые не могли бы даже из переживания разгласить что-то, то ли... В общем, не знаю. Они любезно предложили мне, мимикой, конечно, перебраться к ним в кубрик. Я отказался, остался на палубе вместе со своим грузом. И мы тронулись.

Я думал, раз баржу подали поздно вечером, практически ночью, мы сразу и пойдем своим ходом. Не тут-то было. Буксирчик зафыркал, потянул, обогнул мыс и зашел в бухточку. Тут он пришвартовался к берегу, и мы ночь провели в этой бухточке. Зачем было грузиться ночью, почему не утром? В путь тронулись лишь на следующий день.

Солнце палило нещадно, но мне было интересно. Там где-то было место, где Ермак погиб. Добрались мы в конце концов до полигона. У пристани меня ждали. Ждал представитель службы режима — проверить документы. Ждал автокран. Ждали два грузовика. Быстро все перегрузили и тронулись.

«Двадцать километров в час», — сказал шоферам. По жару... Солнце в зените. Машины на такой

скорости перегреваются. Остановка, вторая, и так все 60 километров. Да мы еще сбились с нужной дороги, а Опытное поле обнесено было по периметру колючей проволокой в два ряда. Или в три? Ну не важно. Подъехали, а ворот-то нет, надо еще несколько километров ехать к контрольно-пропускному пункту.

Я решил: время позднее, ребята устали, ругаются про себя. Говорю: «Давай прямо по колючей проволоке». Два грузовика подмяли колючую проволоку и в нарушение всех режимов переехали. Это я впервые совершил такое правонарушение, чего никогда в жизни себе не позволял.

Переехали мы эту колючую проволоку, выехали на дорогу к командному пункту и тут быстро добрались. Подъезжаем к командному пункту, а там уже весь отдел мой собрался. Встречают: «Наконец-то приехали!» Приехали, стали выгружать, сгрузили, разломали ящики, грузовики отравили, везли программный автомат, провели на место, а он все еще в чехле.

Сняли чехол, и тут мои товарищи увидели, что мы привезли. «У-у-у... Вот это вещь!» Он действительно был великолепен. Они впервые увидели программный автомат. Так мы привезли его на командный пункт. Дальше я занялся подключением к кабелям...

Но позволим себе вывести Сергея Львовича из раздумий давно готовым сорваться вопросом: как же все-таки случилось, что в назначенный день за пультом программного автомата оказался именно он, а не Он?

— Да, это вопрос один из существенных. Не я рвался сесть за пульт, а сами конструктора спровоцировали Курчатова на такой шаг. Дело состояло вот в чем...

На полигон вскоре приехал «сам». Говорят: «Приехал Он, руководитель!» Стал искать: кто же это? В конце концов Курчатова появляется на командном пункте, тут я с ним впервые знакомлюсь. Поразил он меня своей энергией, порастил ясным выражением глаз. Очень энергичный в движениях человек. Приезд Курчатова сопровождался и приездом его подчиненных: Харитона, Щелкина и Чугунова.

Я был страшно огорчен, когда на командном пункте вдруг появился Чугунов. Но еще больше меня поразило, когда вслед за Чугуновым появился и привезенный им программный автомат его конструкции. О таком программном автомате мы и речи не вели, когда Чугунов был у нас в декабре в Институте химической физики. Сергей Сергеевич сказал: «У вас много реле, электроники, а это очень все ненадежно. А я вот сделал простое, механическое...» Харитон присоединяется: «Да, механика — это самое надежное, что есть, а вот электрика — это бог его знает что такое».

Ну что делать? Привезли, поставили рядом с нашим программным автоматом. Вот возвышается наш программный автомат, и рядом поставили обычный двухтумбовый стол, на котором щит с двумя вольтметрами, с двумя или четырьмя рубильниками, а справа ящик, в котором находится программное устройство Чугунова.

Чугунов снова говорит: «Наше надежное и простое!» — «А что значит: надежное?» — «А оно не боится любой неисправности». — «Сергей Сергеевич, но вы же это у нас все узнали: какие принципы заложить. В вашем автомате дублирование — это наш принцип, так? В вашем автомате заложен критерий надежности — одна неисправность не выводит из строя весь автомат, да?» И так далее. Узнав наши принципы, он решил строить свой автомат. Но его автомат был не электрическим, а механическим.

Устройство автомата заключалось в том, что был установлен вал с контактными пластинками и были неподвижные пластинки, которые замыкались с пластинками, вращающимися на валу. А во вращение вал приводился при помощи гири, как у обычных часов-ходиков. Чтобы гири шли равномерно, их поместили в масло. Это умная вещь, конечно. Ну, и было там две пары контактов, все как полагается — две системы.

Харитон настоял на испытании: «Вот давайте сравним, какой, — говорит, — из них лучше». Генерал [П.Я.]Мешик, который отвечал за режим на полигоне, сказал: «Чего, — говорит, — ученые дурят, все же ясно. Этот красивее, он и лучше». Это он про наш автомат сказал. Тем не менее испытание надо проводить. Собрались в кружок: Харитон, Шнирман, я здесь... Запустили автомат Чугунова. И тут выручил Шнирман. Быстро сообразив, он подошел к автомату Чугунова, нажал большим пальцем на ось барабана, и барабан остановился. Спорить было нечего. Принцип надежности был нарушен — одна неисправность нарушала работу всей системы. Вопрос был исчерпан. Казалось...

Но Чугунов хотел все-таки нажать на рубильники, оставив за собой первенство подрыва. Поэтому выбросили этот барабан, оставили только рубильники, хотя это и ухудшало надежность системы. С помощью этих рубильников кабели подрыва подключались к нашему программному автомату. Единственно на чем мы настояли, чтобы поставили на его пульт еще девятиножевой рубильник, который полностью отключал все кабели его пульта от нашего программного автомата.

Этот рубильник заказали в Институте химической физики. Его изготовили, самолетом прислали на полигон и установили. Чугунов пожелал, чтоб этот рубильник был на замке. Пожалуйста. Сделали «ушки» соответствующие. Стали искать на полигоне замок. Искали — нашли, во-от такой большущий амбарный замок. Чугунов был в восторге.

Как извилисты тропинки истории. Именно этот пульт (а не создававшийся Давыдовым) и замок на нем сохранились до наших дней. Впрочем, уточним, тот ли это пульт подрыва, который сейчас выставлен в Музее ядерного оружия в бывшем Арзамасе-16?

— Так точно! Он и есть. Я не знаю, есть ли там этот девятиножевой рубильник.

Свидетельствуем, что есть. На сей счет даже имеется публикация*.

— Вот этот рубильник он и запирает ключом громадным. Но я сделал другую вещь. Когда появился этот пульт, я настоял на том, чтобы мы в соседнем подъезде поставили осциллографы контрольные — «для прокурора». Я вам прямо говорю: «Для прокурора». На этих осциллографах записывались сигналы, которые выдавал мой программный автомат до этого рубильника, и те сигналы, которые уходили после их пульта на кабели подрыва. Понимаете? Чтобы разделить: кто виноват.

Ну хорошо. Стали готовить программный автомат по всем статьям. Игорь Васильевич часто звонил на командный пункт. Вот как-то раз он звонит мне и говорит: «А мог бы ты, понимаешь, запустить программный автомат так, чтобы он взрыв произвел точно в назначенное время астрономически?» А я говорю: «Могу, только мне для этого требуется знать время астрономическое». — «А что тебе для этого надо?» Я говорю: «Мне нужен хронометр».

Через два дня было у меня два хронометра морских. Из Москвы привезли. Тут мы решили организовать службу проверки хронометров по радиосигналам вещательным. Приделали к этим хронометрам пьезодатчики. Выверка с поправками, конечно. Это целая теория, да бог с ней. Таким образом, мы были готовы.

В августе месяце 49-го года на полигоне появилась Государственная комиссия. Впервые я увидел государственного деятеля в лице Первухина, министра**. Я человек не очень преклоняющийся перед авторитетами, но Михаил Георгиевич Первухин меня поразил. Действительно, как мне казалось, это был настоящий государственный деятель. Вдумчивый, серьезный, интеллигентный, что в первую очередь.

Государственная комиссия занялась проверкой полигона и ядерного заряда к испытанию. Прибыли они и на командный пункт автоматике. Я показал Первухину работу программного автомата. Он быстро все понял. Меня это удивило, но я потом

* См.: Дровеников И.С. // Вопросы истории естествознания и техники. 1994. №4. С.107—110.

** М.Г.Первухин в 1949 г. занимал должность министра химической промышленности СССР и одновременно был первым заместителем начальника ПГУ.

узнал, что он по специальности инженер-электрик. Все было доброжелательно, и, казалось, все шло нормально.

Вдруг на меня обрушивается целый поток обвинений, что программный автомат, по мнению конструкторского бюро, ненадежен. Такое заявление, в частности, делает Кирилл Иванович Щелкин, конструктор атомной бомбы. «Ненадежен! — говорит. — Как можно доверять такому программному автомату? Надо провести длительные испытания!» Я говорю: «Все испытания проведены. Вместе проводили». — «Нет, это все недействительно...» Ему поддакивает Чугунов, и начинается такая заваруха... В общем, неприличная, потому что без основательных доводов.

Но у них власть, они и диктуют: «Вот давайте мы составим программу испытаний, скажем, на протяжении недели». — «Зачем неделю гонять, когда ему положено час работать? Так можно загнать все что угодно, любую технику». — «Нет, это условие испытаний!»

И вот мы включили программный автомат и попеременно с моим напарником Денисовым дежурили на командном пункте, а он все отстукивал, отстукивал... Мы мучили программный автомат, но наше детище выдержало все испытания, ни одного сбоя не дало за все это чудовищное издевательство.

Раз программный автомат выдержал все испытания, значит, нужно было признать, что он годится. Но что значит признать... Чугунов, Харитон, Щелкин — они должны были признать безосновательными свои возражения. Это было неприятно. Поэтому Комиссия написала невероятнейшую для государственных комиссий абракадабру, а именно что она считает возможным допустить программный автомат к эксплуатации под личную ответственность товарища Давыдова. Личная ответственность Давыдова — это меня ошарашило. Я понял, что беру на себя всю ответственность.

Нетрудно представить, что это означало и как ково было молодому майору. Неужели Сергей Львович подписал это?

— Я вынужден был подписать, иначе мои ручательства выглядели как блеф. Я подписал. За мной подписал начальник полигона генерал [С.Г.] Колесников. Я понял, что теперь так же отвечаю за испытание, как Курчатов за свой заряд. И потому для меня перестало существовать любое начальство полигона. Я решил, что меня должны слушать, мои команды должны выполняться, и я взялся за подготовку программного автомата. Я лично перебрал весь программный автомат. После недельной гонки я уже не мог надеяться на технику. И программный автомат у меня был готов к назначенному сроку.



Сергей Львович Давыдов, первым в СССР нажавший «атомную кнопку». Фото 1949 г.

Для меня это была большая травма, психологическая, если хотите, потому что человек я был застенчивый, а тут был поставлен обстоятельствами в такое положение. Теперь уже я начальнику полигона говорил: «Мне то-то надо, такое-то реле, такое-то». И он мне присылал. Но я-то для себя все это так оценил, а как Курчатов оценил?

Действительно, как Игорь Васильевич расценил эту ситуацию? Интересно...

— А Курчатов расценил так: раз такая запись в акте, а акт-то он утверждает, значит, никто кроме Давыдова программный автомат не может обслуживать — ведь он персонально отвечает. Так? Значит, Курчатов не может сесть за пульт управления, потому что тем самым он снимет с меня ответственность. И было решено, что за пультом сидит Давыдов.

Если уж истории повезет со свидетелем, то она бывает щедра к своему избраннику. Незадолго до испытаний Сергею Львовичу довелось встретиться с еще одним, весьма примечательным участником советского атомного проекта.

— Приближалось время испытаний. Наконец я услышал, что приехал министр внутренних дел Берия Лаврентий Павлович*. У меня не было предвзятого отношения к нему, потому что в то время никто не говорил, что он враг народа, что он такой и сякой, этого и в помине не было. Но у меня было всегда предвзятое отношение к полицейской службе. Это мне передалось от отца.

Поэтому я без особого восторга воспринял приезд Берии, когда он пришел на командный пункт, невысокого роста человек, очень широкоплечий, или мне так показалось из-за того, что у него был плащ такой широкий с подчеркнутыми плечами. Нос такой орлиный, очки темные на глазах — это он. Вот, в шляпе он... Шляпу снял. Меня поразило, что он не сел в кресло, которое ему предоставили, а встал, облокотившись на перила, как-то так скрючившись.

Шнирман — сразу же на первое место и стал докладывать. А Берия стоит, опершись, и смотрит. Прослушал и сказал: «Да, — говорит, — вот я и буду здесь сидеть. Вот в этой аппаратной».

Поскольку теперь уже все на мне лежало, я сразу же стал думать, как мне избавиться от его присутствия. Представителем Берии ко мне был представлен генерал-лейтенант [А.Н.]Бабкин. Видите, какой чин? Я очень гордился. Ну как же, мальчишка. Вот я и обращаюсь к нему, мол, товарищ генерал, надо, чтобы министра у меня здесь не было. Как? Думали, думали, решили написать инструкцию, что в аппаратной в момент взрыва находятся: Щелкин, Чугунов, Давыдов и мой напарник Денисов. Больше никого. Эту инструкцию дали утвердить Курчатову. Выше Курчатова никого нет, значит, она обязательна и для Берии. Если он захочет посчитаться с ней, конечно. Но надо признать, ему интереснее было с Курчатовым, а поскольку Курчатов находился не в аппаратной, а у себя в кабинете, то и он там со всем штабом обновался.

Такое было мое свидание с Берией. Какое впечатление? Приятное — неприятное? Безразличное. Если я восторгался Первухиным, то не восторгался личностью Берии, и не потому, что плохое что-нибудь... Я в то время о нем ничего не знал, кроме того что у него вышла книжка о большевиках в Закавказье. Помните, была такая книжка — «История компартии Кавказа»**?

Наконец мы приближаемся к самому значительному дню в жизни Сергея Львовича — 29 августа 1949 г. Как он наступил, чем врезался в память?

* Л.П.Берия в 1949 г. занимал должность заместителя председателя СМ СССР и одновременно являлся председателем Спецкомитета.

** Имеется в виду: *Берия Л. К вопросу об истории большевистских организаций в Закавказье. Доклад на собрании Тифлиссского партактива 21—22 июля 1935 г.* [М.]: Партиздат ЦК ВКП(б), 1935.

— Начальство приехало — ждать не может, топчется. Генеральная репетиция, как положено. Проверили — все нормально. Назначается через день испытание атомного заряда.

Накануне, 28-го, готовлю командный пункт к испытанию. Проверяю еще раз программный автомат, настраиваю все что полагается, подзаряжаем аккумуляторы, выдаем команды на Опытное поле — то я, то мой помощник Денисов. Обедать едим по очереди, потому что работа долгая, затягивается допоздна, влезая в ночь, тут и Чугунов приходит, проверяет свои кабели подрыва и работу автоматики заряда, который там на башне. Я ему тоже команды выдаю с программного автомата. Все проходит нормально.

Поздно ночью подготовительные работы заканчиваются. Мы опечатываем аппаратную. Генерал Бабкин выставляет часового с винтовкой у нашей аппаратной. Дескать, объект особой важности. Не подходить! Хотя кругом полно ходит генералов и гражданских лиц — руководителей промышленности.

Взрыв назначен был на сколько, на 8 часов, что ли? Оставалось часа четыре. Я и Денисов отправились спать. И вот слышу под утро: кто-то бежит вдоль домика. Просыпаюсь. Прибежал солдат — послали разыскать меня. Сказал, что нужно срочно явиться на командный пункт. Прибегаю к командному пункту, а тут уже полно машин, тут и Берия, тут и Харитон, тут и Курчатов, и уйма, уйма народа. МГБ и промышленности. Военных не было, ни генерала [В.А.]Болятко, ни министра обороны, никого не было.

Вхожу, смотрю, мучаются около двери аппаратной Кирилл Иванович Щелкин и Чугунов, стоят поеживаются. И говорят: «Сергей Львович, принято решение на час вперед передвинуть взрыв с 8 на 7 часов». А я говорю: «Кирилл Иванович, а чего же мы будем здесь мучиться, среди толпы? Давайте вскроем аппаратную досрочно, сядем там спокойно и посидим этот самый час или сколько там осталось». Кирилл Иванович: «Давайте».

В нарушение инструкции мы приглашаем Бабкина снять часового, входим, запираем свою аппаратную, отключаем все телефоны и сидим молча, уважая душевное состояние друг друга, не проронив ни одного слова.

В положенное время я говорю, что вот, время наступило включать программный автомат. Щелкин нажимает кнопку переговорного устройства, запрашивает у Курчатова разрешение на включение программного автомата, тот дает согласие, я включаю питание, и начинается режим работы.

Остается 10 минут до взрыва. Выдаю первую команду на включение аппаратуры. Опять запрос по переговорному устройству. Курчатов отвечает: «Даю согласие». Я нажимаю кнопку десятиминутного сигнала. Сигнал пошел по кабелям, обошел сооружения, обратный «контроль» вернулся, показался, я докладываю, что сигнал вы-

дан, сигнал прошел, Щелкин передает это донесение Курчатову, Курчатов сообщает: «Вас понял». Так. Первый сигнал прошел. Начинают работать часы.

У нас были по всем комнатам, в том числе и у Курчатова в кабинете, повешены часы «оставшегося времени». В «10 минут» они начинают отсчитывать остающееся время. Диспетчер объявляет по громкоговорящей связи, что осталось 10 минут до взрыва. Ну, напряжение несколько повышается. Ждем.

Следующий сигнал должен быть за минуту. И вот наступает минута, я жду, как срабатывает программный автомат, хлопают дополнительные реле — это самое важное, значит, автомат сработал. Начинается отсчет секунд.

Напряжение возрастает. За 20 секунд выдается один сигнал, другой, за секунду третий, и в «0» — выдается сигнал подрыва! Пошел на «изделие»!

Щелкин докладывает, что сигнал «0» выдан, но никто нам уже не отвечает. Мы поняли, что Курчатов со своим штабом вышел на улицу наблюдать взрыв. Понимаете? Они наблюдали взрыв прямо с улицы.

Никто нам ничего не отвечает, а мы не знаем, взрыв произошел или нет? И вдруг мы слышим шум за дверью. Там люди копошатся, вбегают в помещение. У меня был выделен человек, который должен был входную дверь закрыть быстро, потому что должна была подойти ударная волна и могла поранить людей. Все должны были успеть за 20 секунд скрыться в помещении. И все они вбежали. И Курчатов. Все бегом сюда, в командный пункт. Слышим, что дверь захлопнулась.

В это время раздаются голоса. «Ура! — кричат, — Ура!» Значит, все в порядке. И в это время подходит ударная волна, и как будто большой джинн нам по крыше «Бах! Бах!» — рукой два раза хлопнул, сказал нам «Спасибо!» за то, что мы его выпустили.

Поднимается давление на уши, потом спадает. Все нормально. Щелкин, Чугунов выскакивают из помещения, убегают. Только я их и видел...

А мы с Денисовым остались. Потом Денисов попросился выйти. Я говорю: «Иди, посмотри». Уже никого на командном пункте нет, все куда-то уехали, разбежались. Я остался один. Подождал 40 секунд, пока автомат отработает. Выключил питание, все привел в порядок. И накатила на меня апатия. Мне даже неинтересно было выйти посмотреть, а что же делается в поле? То ли это было после высокого напряжения, то ли обида, что вот мы произвели взрыв и стали никому не нужны...

Я до сих пор не могу это сформулировать, но, наверное, и то и другое, все вместе. И вот, оставшись один, я пошел в соседний подъезд снимать пленки, которые «для прокурора», хотя должен был делать это вместе с Чугуновым. Но Чугунова след простыл, поэтому я снял их один. Они, прав-



Сергей Львович Давыдов на выставке «Атомный проект СССР», посвященной 60-летию создания ядерного щита России. Москва, Выставочный зал федеральных архивов, 24 июля 2009 г.

да, были все с компостерами, так что тут подделки быть не могло. Свернул пленки и думаю: а дальше что делать?

Посмотрел на поле: висит облако. Я понимал, что оно радиоактивное, что опасно, что оно придет сюда, надвинется на командный пункт. А оно действительно надвигалось. Надо уезжать. Денисов и я остались, да еще остался телефонист ВЧ-связи правительственной, который в соседней комнате сидел. Вот нас тут трое только и осталось. Что делать?

У меня машина была, но генерал Бабкин мужик хитрый оказался, он мою машину угнал на полтора километра куда-то в сторону, в поле, чтобы посторонние солдаты не болтались. Дескать, тут Берия и прочая компания. А я поверил ему: «Ты, — говорит, — не волнуйся, я тебя вывезу». А тут ни Бабкина, никого нет, я один. Облако надвигается, что хочешь, то и делай.

Но я напустил на себя такой равнодушный вид, будто ничего не случилось, будто нет какого-то критического состояния, я же знаю, что делать, а мозг напряжен: а что же делать? какое принять решение? Вот раздумываю. Вхожу с этими пленками прокурорскими на командный пункт. Вдруг слышу, тихо подкатывает какая-то машина. Выхожу посмотреть.

Подъехала «Победа», за рулем сидит Мешик. Генерал-лейтенант Мешик... Он приехал за нами. Взял он меня, взял Денисова и взял телефониста. Отвез нас на своей машине к нашим машинам, и мы пересели на свои грузовики. Вот за это я ему благодарен...



И.С.Дровеников у макета первой советской атомной бомбы РДС-1 в Музее ядерного оружия. Саров, 1996 г.

Прерывая на этом месте рассказ Сергея Львовича, остается сокрушаться, как много осталось недосказанным. Осталась недосказанной изустная рецензия на небезызвестный отчет Смита*. Остался недосказанным эпизод с электромагнитным импульсом, впервые в отечественной практике зафиксированным при том подрыве и впоследствии легшим в основу контроля над ядерными испытаниями. Осталась недосказанной обусловленная

* Имеется в виду: *Смит Г.Д.* Атомная энергия для военных целей: Официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США. М., 1946.

этим обстоятельством история взаимоотношений с академиком И.К.Кикоиным. Остались недосказанными впечатления от посещения академических институтов вместе с Курчатовым, когда еще не все знали, что он — это Он. Всего и не перечислишь. Но можно ли исчерпать все, не исчерпав терпения читателей? Да они и сами найдут продолжение этой истории, ведь на сегодняшний день написано и издано немало разного из истории советского атомного проекта. Ну, а если не найдут и захотят дослушать этот рассказ, то рассказчик и его стенограф будут рады новой встрече с ними. ■

Публикация подготовлена в рамках исследований, проводимых при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 08-06-00412-а.

Новости науки

Космические исследования

Стартовал к Луне и начал работать российский нейтронный детектор ЛЕНД

18 июня 2009 г. с космодрома на мысе Канаверал состоялся запуск космического аппарата НАСА «Lunar Reconnaissance Orbiter» («Лунный разведывательный орбитер» — ЛРО). В состав находящейся на его борту научной аппаратуры входит российский нейтронный детектор ЛЕНД (от англ. Lunar Exploration Neutron Detector). Это событие знаменует первый запуск к Луне автоматического исследовательского аппарата по программе НАСА «Constellation» («Созвездие»). Основная задача программы — возобновить пилотируемые полеты на Луну с целью ее освоения. Участие России в проекте ЛРО предусмотрено Исполнительным соглашением между Федеральным космическим агентством (Роскосмосом) и НАСА.

19 июня 2009 г. (20 июня в 05:14 по московскому времени) аппарат ЛЕНД был включен в штатный режим и уже в 08:49 от него были получены первые научные данные. По сообщениям руководителя эксперимента ЛЕНД доктора физико-математических наук И.Г.Митрофанова (Институт космических исследований РАН), экспресс-анализ данных бортовой телеметрии показал, что все системы функционируют нормально. Во время перелета к Луне и на переходной окололунной орбите определялась нейтронная компонента космического радиационного фона, что необходимо для подготовки к основному этапу эксперимента — измерениям нейтронного излучения Луны с круговой полярной орбиты.

С помощью прибора ЛЕНД предполагается составить карту распространения водорода в лунном реголите, а также провести поиск залежей водяного льда в полярных областях Луны. Очевидно, что поиски воды на поверхности Луны — один из ключевых моментов исследования и предстоящего освоения нашего естественного спутника. Кроме того, обнаружение вероятных лунных ледников могло бы предоставить дополнительный ключ к пониманию истории Солнечной системы: полагают, что основным источником водяного льда были кометы, бомбардировавшие Луну на протяжении миллиардов лет, и, стало быть, по распределению льда можно судить, как развивалась Солнечная система с момента ее образования. Прибор ЛЕНД способен обнаружить массовую долю в 0.1% водяного льда в веществе верхнего слоя (до 2 м глубиной) на поверхности Луны. Пространственное разрешение прибора — около 10 км.

Принцип работы прибора ЛЕНД заключается в регистрации нейтронов, которые рождаются в поверхностном слое лунного грунта под воздействием галактических космических лучей и затем вылетают в космос. Величина потока и энергетический спектр этого нейтронного излучения зависят главным образом от концентрации водорода и водородсодержащих соединений (в частности, воды) в составе вещества лунной поверхности. Для регистрации нейтронов и гамма-лучей в приборе используются 10 независимых детекторов. Получение высокого пространственного разрешения обеспечивается благодаря оснащению детектора специальным блоком коллимирования нейтронов: он повышает чувстви-

тельность при наблюдениях отдельного участка поверхности, «отсекая» нейтроны, пришедшие с других ее участков.

Исследование Луны прибором ЛЕНД включено в Федеральную космическую программу России. Этот орбитальный нейтронный детектор создавался в Институте космических исследований РАН в 2005—2009 гг. по заказу Роскосмоса. В работах принимали участие Научно-исследовательский институт атомных реакторов (г.Дмитровград), Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН (г.Москва), Объединенный институт ядерных исследований (г.Дубна), Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга МГУ (Москва). В эксперименте с прибором ЛЕНД будут участвовать также американские специалисты из разных научных центров США.

По сообщениям Пресс-службы Института космических исследований РАН (Москва)

Астрофизика

И вдруг погасли две звезды...

По мере накопления наблюдательных данных у астрономов появляется возможность, заметив на небе какое-либо интересное явление, найти в архиве снимок той же области неба, сделанный по другому поводу за несколько лет до этого. Особенно такая возможность интересна для изучения предшествующих вспышек сверхновых — она дает бесценный шанс увидеть, как выглядит звезда незадолго перед уничтожающим ее взрывом.

До недавнего времени единственной сверхновой, для которой удалось достоверно найти на архивных фотографиях взорвавшуюся

юся звезду, была сверхновая SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке — карликовой галактике недалеко от Млечного Пути. Особого облегчения эта находка теоретикам не принесла. Согласно теории эволюции массивных звезд вспышка сверхновой должна была произойти на завершающей стадии жизни звезды — на стадии красного холодного сверхгиганта. Однако предшественник SN 1987A оказался более молодым объектом — тоже сверхгигантом, но голубым, т.е. горячим. С тех пор с помощью моделей массивных звезд было показано, что перед вспышкой они могут еще раз становиться голубыми сверхгигантами — из-за интенсивной потери вещества атмосферы у звезды обнажаются в это время ее более горячие внутренние слои. Однако понятно, что ни корректировать теорию звездной эволюции, ни подозревать ее в неправильности нельзя на основе единственного объекта.

И вот Дж.Маунд (J.Maund; Институт им.Нильса Бора, Дания) и С.Смарт (S.Smartt; Королевский университет в Белфасте, Великобритания) нашли еще две сверхновые II типа, предшественники которых были запечатлены за несколько лет до вспышки. Чтобы идентификация предшественников была однозначной, они использовали очень простой критерий: звезда должна быть видимой на снимках, полученных до вспышки, и отсутствовать на снимках, сделанных после вспышки.

Одна из этих сверхновых — SN 2003gd — вспыхнула в галактике M74. На старых снимках этой галактики, полученных с помощью космического телескопа «Hubble», в месте вспышки обнаружился красный сверхгигант спектрального класса M0—M2 с массой порядка 8—10 M_{\odot} . Чтобы убедиться, что в 2003 г. взорвался именно он, Маунд и Сарт в сентябре 2008 г. еще раз сфотографировали тот же участок неба, используя телескоп «Gemini». Тщательный анализ снимков показал: в том месте, где раньше находилась звезда, а потом вспыхнула сверхновая, те-

перь нет точечного источника излучения той же яркости, какая была у предшественника. Если в этой точке и есть какой-то объект, то он как минимум на две величины тусклее предшественника и не попадает в пределы чувствительности наблюдений.

Несколько сложнее обстоит дело со сверхновой SN 1993J. Судя по архивным снимкам, ее предшественником был сверхгигант спектрального класса K, т.е. более горячий, чем красный предшественник сверхновой SN 2003gd. К тому же у него наблюдалось избыточное излучение в ультрафиолетовом диапазоне, что для звезд этого спектрального класса нетипично. Высказывалось предположение, что в данном случае вспышка произошла в двойной системе. Более массивный компонент с массой около 15 M_{\odot} проэволюционировал быстрее и на стадии супергиганта сбросил часть оболочки на компаньон, перейдя из холодного спектрального класса M в класс K — опять же по той причине, что сброс оболочки обнажил более горячие слои. Компаньон, в свою очередь, прибавив в массе, тоже разгорелся и стал источником УФ-избытка.

Окрестности сверхновой SN 1993J за последние годы несколько раз фотографировались с помощью телескопа «Hubble». За это время яркость системы в красной области спектра, значительно выросшая при вспышке, постепенно слабела и в 2004 г. упала ниже исходной яркости K-сверхгиганта, который до вспышки доминировал в этом диапазоне. По расчетам авторов, к 2012 г. в спектре системы сохранится только вклад оставшегося в ней V-сверхгиганта.

Таким образом, Маунду и Смарту удалось продемонстрировать, что вспышки сверхновых II типа действительно связаны с завершающим этапом эволюции сверхгигантов поздних спектральных классов, причем звезда после вспышки уже не наблюдается — она перестает существовать. Можно сказать, что теория эволюции умеренно массивных звезд (с массами менее 20 солнечных) получила убедительное подтверждение.

Теперь остается ждать, пока Природа предоставит нам случай непосредственно изучить более массивные предшественники вспышек сверхновых, когда при вероятных вариантах вспышки возникает много важных нюансов.

Science. 2009. V.324. №5926. P.486 (США).

Астрофизика

Сверхновая в галактике M82

Неправильная галактика M82, удаленная от нас на 12 млн св. лет, по размерам уступает Млечному Пути, но существенно превосходит его по активности. В центре этой галактики расположена область сверхактивного звездообразования. Ее поперечник составляет всего несколько сотен световых лет, но в ней рождается больше звезд, чем во всей нашей Галактике. M82 часто называют «взрывающейся галактикой»: на оптических и инфракрасных изображениях она выглядит так, словно какой-то внутренний процесс действительно в клочья разорвал ее центральную часть.

Само наличие вспышки звездообразования в ядре M82 вроде бы не должно вызывать сомнений в сущности этого процесса: в такой области должны происходить частые взрывы сверхновых, которыми завершают свою краткую эволюцию массивные звезды. На радиоизображениях галактики действительно видны многочисленные остатки прежних сверхновых, однако самих взрывов в M82 за четверть века наблюдений зафиксировать почему-то не удалось. Точнее, одна вспышка произошла в 2004 г., но она никак не проявила себя в радиодиапазоне и, вероятно, генетически не связана с другими остатками.

Возможную причину отсутствия сверхновых в центре «взрывающейся галактики» обнаружили А.Брунталер (A.Brunthaler; Институт радиоастрономии Общества им.М.Планка) и его коллеги. В апреле 2009 г. они наблюдали ядро M82 с помощью интерферометра VLA (Very Large Array — Очень

большая решетка), установленно-го в штате Нью-Мексико (США), и обнаружили на снимках очень молодой остаток сверхновой. Изучение изображений галактики, полученных годом раньше, в марте и мае 2008 г., показало, что вспышка присутствует и на них, причем ее светимость в радиодиапазоне за прошедший год упала на порядок. При этом во время одновременных наблюдений в оптическом диапазоне никаких вспышек в M82 не отмечено. На снимках, сделанных до 2008 г., какой-либо источник в данной точке не проявляется ни в одном диапазоне — от радио- до рентгеновского.

Наилучшим объяснением для внезапно появившегося и постепенно угасающего источника следует считать вспышку сверхновой. Излучением в радиодиапазоне сопровождаются только взрывы, происходящие при коллапсе ядра массивной звезды. Генерация радиоизлучения происходит при распространении ударной волны по плотному веществу, окружающему взорвавшуюся звезду. Как правило, это вещество сброшено самой же звездой на более ранних эволюционных стадиях.

Объединив лучшие радиотелескопы современности — VLA, радиоинтерферометрическую систему VLBA, телескопы в Грин-Бэнк (США) и Эффельсберге (Германия), ученые смогли получить изображение кольцеобразной структуры, которая расширяется со скоростью около 10 тыс. км/с. Сопоставление этой скорости с размером кольца позволило оценить примерное время вспышки — конец января или начало февраля 2008 г.

Скорее всего, вспышка, получившая обозначение SN 2008iz, произошла очень близко к центру галактики — там, где излучение максимально поглощается многочисленными газово-пылевыми облаками. Это — ближайшая к нам сверхновая за последние пять лет, и если бы взрыв звезды случился в «открытой местности», его с легкостью можно было бы наблюдать даже в любительский телескоп. Однако плотная межзвездная среда в M82 полностью скрыла его от

инфракрасных, оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских телескопов. Этим, видимо, и объясняется кажущееся отсутствие вспышек в галактике — возможно, их просто искали не в тех диапазонах.

Открытие Брунталера и его коллег подчеркивает важность мониторинга сверхновых на всех доступных длинах волн. Один из таких обзоров начался недавно на ATA (Allen Telescope Array — Система телескопов Аллена) — предусмотренное ежедневное сканирование неба в радиодиапазоне позволит обнаруживать сверхновые, в 10 раз более слабые, чем SN 2008iz.

Astronomy and Astrophysics. 2009. V. 499. P.L17 (Международный журнал).

Физика

Магнитная запись с помощью электрического поля

Магнитная запись информации сейчас применяется в каждом персональном компьютере, и ожидается, что в будущем магнитная память произвольного доступа (MRAM) заменит полупроводниковую.

Проблема считывания в магнитных запоминающих устройствах успешно решена с помощью датчиков на гигантском магнитосопротивлении, а вот запись все еще осуществляется дедовскими методами, восходящими к опытам Х.К.Эрстеда: магнитное поле создается электрическим током. Такой способ уже не устраивает технологов: при дальнейшем уменьшении размеров проводников для создания полей той же напряженности потребуется такое увеличение плотности тока, которое вызовет их перегрев и разрушение. Поэтому исследователи обратились к электрической записи магнитной информации, тем более, что тут сама природа подсказывает решение в виде магнитоэлектриков — материалов, в которых магнитная и электрическая подсистемы сосуществуют и взаимосвязаны.

Недавно индийским ученым удалось наблюдать магнитную до-

менную структуру, наведенную электрическим полем, в образце на основе феррита висмута (BiFeO_3). Он хорошо знаком специалистам как один из немногих материалов, сохраняющих свои магнитоэлектрические свойства при комнатной температуре¹. Однако магнитные моменты подрешеток в этом антиферромагнетике практически полностью уравновешивают друг друга, и нужны специальные ухищрения для визуализации магнитоэлектрических эффектов². Вот почему непосредственно наблюдать изменение магнитной доменной структуры под действием электрического поля при комнатных температурах удавалось до недавнего времени лишь в пленках ферритов-гранатов³.

Теперь это стало возможным в пленках феррита висмута (толщина 200 нм) с добавлением диспрозия $\text{Bi}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{FeO}_3$. В отличие от чистого феррита висмута, в $\text{Bi}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{FeO}_3$ наблюдается отчетливая магнитная структура, и, что самое интересное, эта структура «слушается» электрического поля. При подаче между поверхностью пленки и ее подложкой напряжения в 10 В магнитные домены вытягиваются в полосы. Как полагают экспериментаторы, это происходит вследствие вызываемых в пленке электрическим полем (за счет пьезоэффекта) механических деформаций, которые, в свою очередь, посредством магнитоэлектрики изменяют магнитную анизотропию, приводя к перестройке магнитной структуры. (Знак электрического напряжения не влияет на результат, что отличает данный эффект от аналогичного, наблюдаемого в пленках ферритов-гранатов, в которых при переключении полярности смещение доменных границ меняется на противоположное.) Полосовые домены в феррите висмута сохраняются и после снятия на-

¹ Palkar VR, Prashanthi K. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V.93. P.132906.

² Ying-Hao Chu et al. // *Nature Materials*. 2008. V.7. P.478.

³ Логинов А.С. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т.86. С.124.

пряжения, а поскольку они видны в магнитный силовой микроскоп, то могут быть считаны также магнитной головкой жесткого диска, что свидетельствует о возможности реализации схемы электрической записи/магнитное считывание.

Интересно, что в этом же материале продемонстрирован и обратный эффект. Магнитное поле существенно влияет на сегнетоэлектрический гистерезис: если в отсутствие магнитного поля насыщение электрической поляризации достигается в поле 60 кВ/см, то при помещении образцов в магнитное поле величиной 0.02 Тл для достижения насыщения уже достаточно поля 30 кВ/см.

<http://perst.ispp.ras.ru>
(2008. Т.15. Вып.20).

Физика

Экстраординарная прочность нанотрубок подтверждена

На протяжении всей истории человечества не прекращался поиск новых материалов со все более совершенными механическими характеристиками. В память о достигнутых на этом пути успехах нам остались названия соответствующих эпох: каменный, бронзовый, железный века... После открытия углеродных нанотрубок стала обсуждаться возможность их использования для изготовления сверхпрочных материалов нового поколения. Теория предсказывала, что твердость и прочность нанотрубок значительно выше, чем у всех известных конструкционных материалов, но экспериментально это очень долго подтвердить не удавалось.

И вот американские исследователи из Северо-Западного университета (г.Эванстон, штат Иллинойс) и Лос-Аламосской национальной лаборатории (штат Нью-Мексико) впервые показали, что нанотрубки действительно так прочны, как предсказывают квантово-механические расчеты¹. Более того, они обнаружили, что

¹ Peng B. et al. // Nature Nanotechn. 2008. V.3. P.626—631.

предел прочности многостенных нанотрубок можно повысить еще более за счет контролируемого формирования связей между соседними стенками. Это достигается путем облучения нанотрубок электронами. В отличие от предыдущих работ, экспериментаторы изучали поведение нанотрубок при механической нагрузке посредством просвечивающей (а не сканирующей) электронной микроскопии.

Первым практическим применением углеродных нанотрубок в материаловедении станет, по видимому, их использование для укрепления полимерных композитов. Пока этому препятствуют сравнительная дороговизна нанотрубок, а также проблема, связанная с их тенденцией образовывать связки, вместо того чтобы равномерно диспергироваться по полимерной матрице. Кроме того, слабым звеном могут оказаться границы раздела между нанотрубками и матрицей: именно на таких границах зарождаются трещины, распространяющиеся затем по всему образцу и приводящие к его разрушению. Если все эти барьеры удастся преодолеть, наступит... нанотрубочный век!

<http://perst.ispp.ras.ru>
(2008. Т.15. Вып.20).

Материаловедение

Опущение из нанотрубок упрочняет композиты

Группа специалистов под руководством Б.Уардла (B.Wardle; Массачусетский технологический институт, США) нашла изящное техническое решение старой проблемы расслоения материалов, применяемых в авиационной промышленности. Они представляют собой несколько слоев ткани из углеродных волокон, пропитанных эпоксидными смолами, которые склеивают тканевую основу в легкий композитный материал. Поскольку прочность самого углеродного волокна намного выше прочности связующего материала, слои со временем, под действием напряжений и вибрационных на-

грузок, утрачивают связь друг с другом — происходит межслойное растрескивание. Такой внешне незаметный дефект может привести к разрушению самолета в воздухе.

Исследователи разработали химический процесс, при котором углеродные волокна, нагретые до 750°C, покрываются опущением из растущих на них углеродных нанотрубок. Затем из этих опущенных волокон изготавливают ткань, пропитывают ее эпоксидной смолой и складывают в несколько слоев. Нанотрубки связывают слои друг с другом, как застежки-липучки. Метод вполне разработан для коммерческого использования. Новый гибридный материал вдесятеро превосходит известные композиты по прочности, причем технологически можно повысить ее еще больше.

<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/03/090304131224.htm>

Химия. Технология

Бумага из нанотрубок методом прокатки

Благодаря своим уникальным свойствам углеродные нанотрубки уже давно привлекли внимание исследователей, работающих над созданием новых материалов для катализаторов, фильтров, электродов, конденсаторов и др. Особенно удобно для этих целей использовать макроскопические пластины из нанотрубок — так называемую бумагу, которая в идеале должна иметь столь же хорошие механические, электрические и термические свойства, как и отдельные нанотрубки. Обычно такой материал получают фильтрацией суспензии из нанотрубок с последующим промыванием и сушкой. Уже получены макроскопические пластинки из одностенных трубок, у которых в соленой воде (в физиологических условиях) при низком напряжении выявились свойства не худшие, а иногда даже лучшие, чем у естественных мышц.

Но, к сожалению, получаемая бумага по своим характеристикам

(модулю упругости, тепло- и электропроводности) заметно уступает отдельным нанотрубкам. В основном это связано с тем, что нанотрубки в ней искривлены, спутаны, ориентированы случайным образом. Поэтому очень важно разработать эффективные методы их ориентирования. Предлагаются различные пути, например с использованием магнитного поля, но они довольно сложны, к тому же улучшить характеристики помогают лишь частично.

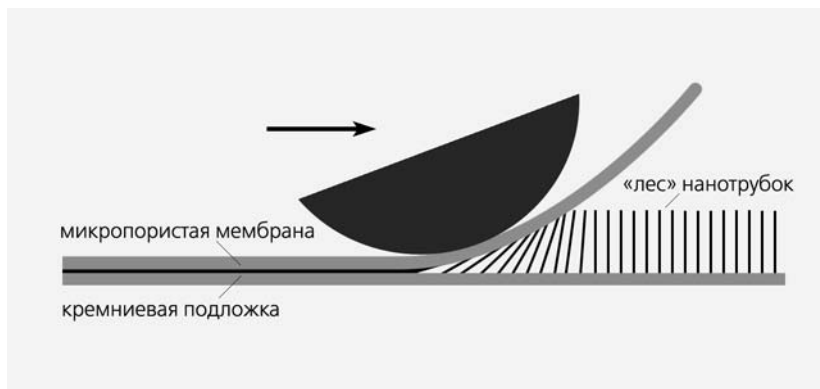
Интересную методику получения бумаги из нанотрубок недавно разработали китайские исследователи¹. Для получения больших по площади толстых плотных листов из ориентированных нанотрубок они предложили использовать принцип домино!

Рассмотрим, в чем состоит новый способ. Сначала методом химического газофазного осаждения на кремниевой подложке (обычно это круг диаметром 10 см) выращивают густой «лес» многостенных нанотрубок высотой более 100 мкм. Затем применяют принцип домино: массив нанотрубок покрывают микропористой мембраной и «прокатывают» небольшим стальным валиком. Сплюснутые нанотрубки благодаря силам Ван-дер-Ваальса притягиваются друг к другу, и образуется плотная бумага. От подложки ее легко отделяют с помощью микропористой мембраны, которую затем снимают, пропитав этанолом.

Бумага получается прочной и гибкой, с очень гладкой поверхностью. Электронная микроскопия подтвердила, что материал плотный и состоит из хорошо ориентированных нанотрубок.

Эффективная теплопроводность бумаги в направлении ориентирования нанотрубок равна 331 Вт/(м·К) — это намного меньше, чем у индивидуальной нанотрубки, но выше, чем у алюминия, близко по величине к меди и лучше ранее полученных результатов. В поперечном направлении теплопроводность равна 72 Вт/(м·К),

¹ Wang D. et al. // Nanotechnology. 2008. V.19. P.075609.



Формирование бумаги из ориентированных нанотрубок.

в то время как у образца с нанотрубками, ориентированными случайным образом, она составляет 81 Вт/(м·К). Такие свойства могут помочь решить проблему отвода тепла в микроэлектронике. Электропроводность бумаги в продольном направлении оказалась выше, чем у прежних образцов.

Такие материалы с контролируемой структурой, по мнению экспериментаторов, наиболее перспективны для электродов суперконденсаторов.

<http://perst.issp.ras.ru>
(2008. Т.15. Вып.20).

Зоология

Изучая хвосты змей...

Широко известно использование хвоста ящерицами в различных целях. Хрестоматийный пример — аутоотомия (отбрасывание хвоста ради спасения жизни). Между тем и у змей хвост выполняет различные жизненно важные функции, изучение которых помогает понять некоторые закономерности эволюции.

Две такие функции исследовали австралийские специалисты из Университета Сиднея, работавшие под руководством видного герпетолога Р.Шайна (R.Shine). Результаты их исследований с моделированием змеино го хвоста опубликованы в журнале, издаваемом Британским экологическим обществом².

² Functional Ecology. 2008. V.22. №2. P.317—322; №6. P.1134—1139.

В одном из экспериментов изучались особенности охоты аспидовой змеи *Acanthopbis prae-longus*. Как и многие другие подстерегающие змеи, этот крупный ядовитый хищник использует для приманивания потенциальной жертвы движения кончика хвоста: змея лежит совершенно неподвижно, а самый кончик хвоста извивается и подрагивает, имитируя движения мелких животных. В природе акантофис охотится на ящериц и лягушек. Ученые проводили видеосъемку поведения змей, различающихся по размерам и полу. В террариумы к ним подсаживали потенциальную добычу разных видов; использовалась также механическая модель, воспроизводящая движения хвоста с заданной интенсивностью и типом движений. Оказалось, что характер, частота и продолжительность движений хвоста индивидуальны и весьма изменчивы. Жертвы реагируют на такую «приманку» по-разному, но эффективнее всего она действует на ящериц. А змеи, очевидно, «понимая» это, используют приманивающие движения хвоста именно при виде ящериц. Ящериц привлекают в первую очередь небольшие хвосты, совершающие не слишком энергичные движения. Вероятно, поэтому более успешно охотятся подобным образом молодые змеи. Что касается лягушек, то акантофису приходится добывать их с помощью иных уловок.

В ходе второго исследования изучалось влияние формы хвоста

на характер передвижения водных змей. И в этом случае были проведены оригинальные лабораторные эксперименты: молодым тигровым змеям *Notechis scutatus* прикрепляли к хвосту... лапы разных размеров и регистрировали, как изменяются их движения в воде и на суше. Небольшой лап на хвосте увеличивает скорость плавания змеи на 25%, а ползание по земле с таким же снаряжением замедляется на 17%. При этом в воде небольшой лап более эффективен, чем крупный.

По мнению австралийских герпетологов, небольшое латеральное уплощение хвоста давало функциональные преимущества тем первым змеям, которые переходили от ползания по земле к плаванию.

© Семенов Д.В.,

кандидат биологических наук
Москва

Климатология

Моделирование климата раннего плейстоцена

Теплый климат раннего плейстоцена (5–3 млн лет назад) привлекает внимание ученых как аналог того, к чему может привести современное глобальное потепление. В самом деле, внешние факторы, определяющие климат, — интенсивность солнечного излучения, конфигурация материков и, самое важное, концентрация CO₂ в атмосфере были в ту эпоху близки к современному. Однако климат в высоких широтах был теплее, наземные покровные ледники в Северном полушарии практически отсутствовали, а уровень океана был примерно на 25 м выше нынешнего.

В тропиках климат тоже был совсем другим. Перепад температуры поверхности моря (ТПМ) между восточными и западными окраинами Тихого океана на широте экватора был крайне мал, и холодные глубинные воды не поднимались к поверхности в зонах апвеллинга вблизи западных побережий Африки и Северной и Южной Америки. Такие клима-

тические условия известны под названием «постоянный Эль-Ниньо». Этот термин описывает долговременное среднее состояние системы океан—атмосфера. Напротив, характерное для современной эпохи краткосрочное состояние Эль-Ниньо — это теплая фаза квазипериодических колебаний климата, повсеместно влияющих на погоду и климат раз в четыре или пять лет. Межгодовая изменчивость климата могла существовать также и в плейстоцене, но лишь в те периоды времени, когда экваториальный градиент ТПМ превышал некоторое критическое значение.

Международная группа ученых из США и Китая изучала меридиональное распределение ТПМ и его влияние на климат раннего плейстоцена. Выяснение изменений этого распределения, в том числе вариаций меридиональной протяженности тропического пула теплой воды, существенно для понимания механизмов постепенного перехода от более теплого плейстоцена к более холодному плейстоцену. Предполагалось, что в раннем плейстоцене термоклин в тропиках простирался глубже и последующее уменьшение его глубины связано с переходом к более холодному климату. Для поддержания более глубокого тропического термоклина требуется меньший меридиональный градиент температуры.

Сначала авторы проанализировали изменения меридионального градиента ТПМ, происходившие за последние 4 млн лет в тропическом поясе на востоке Тихого океана, для чего сравнили колонки донных осадков в двух точках: у побережья Калифорнии (32°с.ш., 118°з.д.) и в холодном языке восточной части Тихого океана, чуть южнее экватора (3°ю.ш., 91°з.д.).

Полученные результаты указывают, что здесь в раннем плейстоцене климат был существенно теплее по сравнению с прежними реконструкциями. Кроме того, выявленное в этом исследовании сильное уменьшение градиента ТПМ между экватором и субтропиками озна-

чает значительное расширение низкоширотного пула теплой воды по направлению к полюсам, в то время как максимальные температуры в тропиках оставались близкими к современным значениям (от 28 до 29°C).

Тропический пул теплой воды (ныне ограниченный в основном западной частью Тихого океана) — важнейший компонент климатической системы, и изменения его меридиональной протяженности оказывают существенное влияние на климат. В частности, его расширение на север и на юг служит ключевым механизмом поддержания постоянного Эль-Ниньо в экваториальной области, поскольку в наше время холодная вода, поднимающаяся к поверхности у восточного экваториального побережья Тихого океана, черпается из субтропических зон, где вода опускается вниз. Расширение теплого пула к полюсам, захватывающее эти зоны, должно вызвать потепление воды, поднимающейся из глубин у восточного экваториального побережья Тихого океана, и увеличение глубины термоклина, а значит, существенное уменьшение градиента ТПМ вдоль экватора. По-видимому, подобный климатический режим преобладал около 4 млн лет назад. Поэтому, чтобы объяснить состояние постоянного Эль-Ниньо в раннем плейстоцене, необходимо понять последствия меридионального расширения океанского теплого пула.

Чтобы количественно оценить отклик атмосферы на расширение тропического теплого пула и уменьшение меридионального температурного градиента, авторы построили гипотетический профиль ТПМ, соответствующий значениям температуры в указанных точках в раннем плейстоцене, и затем использовали этот профиль в качестве граничного условия для модели глобальной атмосферной циркуляции.

Численное моделирование, как и ожидалось, подтвердило, что отсутствие градиента ТПМ вдоль экватора подавляет зональную циркуляцию атмосферы. Однако если

поддерживать меридиональный градиент ТПМ на современном уровне, как это делалось в предыдущих исследованиях, то в качестве компенсации меридиональная циркуляция атмосферы (ячейки Хэдли) существенно усилилась бы. Напротив, в моделировании, использующем предложенную авторами реконструкцию ТПМ плиоцена, циркуляция Хэдли ослабевает. Неясно, можно ли считать это подлинной особенностью климата раннего плиоцена, так как в Южном полушарии данные о ТПМ того времени пока известны лишь для небольшого количества точек.

Авторы приходят к выводу, что при численном моделировании климата раннего плиоцена, а также при моделировании реакции тропиков на современное глобальное потепление может оказаться необходимым включить в модель дополнительные механизмы, позволяющие усилить поглощение тепла океаном. Очень серьезные последствия изменения тропического теплового пула, а также косвенные данные о том, что за последние десятилетия тропический пояс начал расширяться к полюсам, делают эти результаты особенно актуальными для нынешних дискуссий о глобальном потеплении.

Science. 2009. V.323. P.1714–1718 (США).

Археология

Костные остатки животных из Мангазеи

Чем питались, кого содержали и разводили жители Мангазейского городища, выясняла Н.Е.Бобковская (Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН, Екатеринбург). Во время археологических раскопок Мангазеи, проводившихся в 2005–2007 гг., было собрано в общей сложности 18 455 костных остатков, в том числе 5282 кости млекопитающих, 10 129 костей птиц, 3044 — рыб. Среди 15 видов млекопитающих определены шесть видов домашних животных (в их числе крупный рогатый скот, свинья, лошадь, овца, кошка и собака), причем среди копытных домашние животные преобладают не только по количеству сохранившихся костей, но и по числу видов. Немногочисленными оказались находки пушных животных.

У крупного рогатого скота (*Bos taurus*) почти все кости принадлежат взрослым и полувзрослым особям. На трубчатых костях, ребрах, позвонках, нижних челюстях и фрагментах черепа видны следы разделки, много погрызено собаками. Небольшое число содержащегося жителями крупного рогатого скота связано, по мнению Бобковской, с трудностью заготовки кормов на зиму.

У свиньи (*Sus scrofa*) кости сильно раздроблены, со следами разделки и погрызов собаками. Представлены все возрастные группы, что свидетельствует о разведении этих животных в Мангазее. Помимо мяса использовались, вероятно, шкуры и щетина. Кормом для свиней, скорее всего, была рыба.

Северный олень (*Rangifer tarandus*) отнесен к домашним животным условно (определить по костным остаткам принадлежность к дикой или одомашненной форме трудно). Несомненно, что он использовался чрезвычайно широко — и как пищевой ресурс, и как транспортное животное, а из его рогов делали различные предметы, о чем свидетельствуют их фрагменты со следами обработки и роговая стружка.

Собака (*Canis familiaris*) определена по 180 костям, в том числе по двум почти полным скелетам, у которых головы отрублены, причем одна унесена с площади раскопа. Однозначно интерпретировать эти находки автор затрудняется, хотя очевидно, что собаки были убиты преднамеренно. Следов порубов мало — в основном кости подверглись естественному механическому разрушению.

На одном из участков найден фрагмент большеберцовой кости лошади (*Equus caballus*), на другом — целая таранная кость овцы (*Ovis aries*). Конечно, единичная

кость овцы не может служить свидетельством домашнего содержания *O. aries*, однако нельзя исключить, что таранные кости этого животного, использующиеся и в качестве игральные принадлежности, и для разных бытовых нужд, могли завозиться в Мангазее именно с такими целями.

На площади раскопа обнаружены две нижние челюсти взрослых кошек (*Felis catus*), относящиеся к разным особям.

Из диких млекопитающих наибольшее число костей принадлежит зайцу, лосю и песцу. Заяц (*Lepus timidus*) — самый многочисленный вид на территории Мангазейского городища. Представлены все отделы скелета; встречаются и отдельные кости, и их скопления вперемешку с костями птиц, рыб, фрагментами заячьих лап в шерсти и без шерсти, а также когти и клочки шерсти. Все это говорит о том, что на поселение приносили целые тушки, а затем разделяли их. Скорее всего, заяц использовался и как источник мяса, и как объект пушного промысла, а задние лапы могли применяться для подметания мусора.

Охота на песца (*Alopex lagopus*) велась на промысловых участках, а в город приносили только шкурки, о чем говорит всего 39 костей этого пушного вида. Кости медведя, волка, лисицы, россомахи, горностая и бобра единичны: очевидно, пушных животных разделяли в местах промысла.

Найденные на территории раскопа фрагменты бивней мамонта и китового уса были доставлены в Мангазейское городище для ремесленного использования.

По заключению автора, основу белкового питания жителей города составляло мясо (возможно, и молоко) крупного рогатого скота; коров и свиней жители города содержали и разводили. Очень большое место в рационе мангазейцев занимали зайцы, пернатая дичь и рыба. Пушной промысел велся далеко от городища.

Труды II (XVIII) Всероссийского археологического съезда в Суздале 2008. Т.1. С.330–332 (Россия).

Гляциологические мотивы

Е.М.Зингер,
почетный полярник
Институт географии РАН
Москва

Так тепло рассказывать про лед может только человек, влюбленный в свое дело. Из книги читатель узнает много нового и интересного о роли и значении для человечества ледников и ледниковых районов Земли, об истории изучения, а также об исследовании их в настоящее время.

Для жителей нашей страны все, что связано с холодами, со снегом, со льдом, с морозом, наполнено особым смыслом. Им близки зимние, морозные, в конце концов гляциологические мотивы.

Автор «Сверкающего мира снега и льда» пытается показать, что в ледниках, в их движении, питании, температурном режиме, развитии еще немало загадок, в изучение которых внесли большой вклад наши соотечественники.

Существование ледников, их состояние оказывают чувствительное влияние на погоду в планетарном масштабе. Они поддерживают естественное гармоничное равновесие природы, теплообменное «дыхание» Земли.

Не уготовано ли нам космическое замерзание? Начнется ли новый ледниковый период на Земле? Или надо опасаться таяния ледников и глобального потопы? Насколько от вечных снегов зависит климат?

Нет однозначных ответов на эти вопросы, но ясно одно: судьба планеты неразрывно связана с феноменальными творениями — ледниками. Они — такая же грозная и прекрасная стихия, как море и горы. И лед-

никовое ожерелье таит в себе еще много тайн...

Не мог автор пройти мимо ледяного континента — Антарктиды. Говоря об этом континенте, ученые, как правило, обращают внимание на мощность льда. И особенно на то, что могло бы произойти, если бы этот лед растаял... О том, что таяние льдов Антарктиды привело бы к повышению уровня Мирового океана на 60 м, затоплению всех портовых городов мира и прибрежных равнин, говорят уверенно. Вопросы о глобальном потеплении и возможном таянии окраины антарктического ледникового покрова обсуждаются на самых разных уровнях.

Существуя миллионы лет, ледники активно влияют на природу планеты. Они охлаждают климат, определяют его колебания, воздействуют на теплообмен и изменяют уровень Мирового океана. Но до сих пор остается еще множество нерешенных вопросов, интригующих тем, связанных с «холодовой» тематикой.

Со снежно-ледовыми проблемами переплетаются таинственные явления на Земле, вопросы криптозоологии, археологические находки, вытравившиеся изо льда, уходящие в глубь столетий проблемы гипотетических высокоразвитых цивилизаций, тайны космического холода и оледенения на других планетах — все это интересно не только ученым.

Ледников на планете многие тысячи. И каждый из них со своим «характером». Читателю дана возможность посетить наиболее примечательные и знаменитые из них.



Ю.П.Супруненко. СВЕРКАЮЩИЙ МИР СНЕГА И ЛЬДА. ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ГЛЯЦИОЛОГИЯ.

М.: ОАО Московские учебники и картолитогрфия, 2008. 528 с.

...И теперь несколько замечаний общего характера. Мне не раз приходилось слышать жалобы на недостаток научно-популярной литературы. Как преодолеть этот дефицит?

Но в последнее время место научно выверенных, интересно и увлекательно написанных книг занимает антинаучная литература. Антинаука агрессивна и в плане саморекламы обгоняет науку и ее популяризацию. В связи с этим необходимо разработать специфические коммерческие рычаги по продвижению научно-популярной литературы на рынок, использовать весь арсенал современных средств, в том числе Интернет, рекламу и т.д.

Раньше многие ученые, путешественники были склонны к писательству. Н.М.Пржевальский, В.К.Арсеньев, В.А.Обручев, И.А.Ефремов, А.Е.Ферман, В.И.Вернадский — примеров достаточно. И хотя земля исхожена вдоль и поперек, исследована в различных своих проявлениях, не иссякает потребность в романтике трудных путей, познавательном описании исследовательских маршрутов.

Не стоит умалчивать, что научно-популярная литература не приносит супердоходов ни писателям, ни издателям и, по сути, может существовать лишь на дополнительные гранты, бюджетное финансирование и благода-

ря помощи Министерства по печати. Ведь тот тираж в 15 тыс. экземпляров, который установило издательство для книги Ю.П.Супруненко, может оправдать себя лишь с помощью государственных структур, налаженной системы распространения издательской продукции, поддержки Министерства образования.

Умение заинтересовать читателей своей работой дано не всем ученым. Научная популяризация — это не вульгарный науцпоп, так сказать, попса от науки. Истинная популяризация расширяет естественно-научный кругозор. Она создает язык взаимопонимания между узкими специалистами, а тем более между представителями разных наук. И кажется, кому как не научным работникам быть ответственными за популяризацию своих достижений. Есть веские основания думать, что легче ученого научить доступно излагать свои взгляды, чем журналиста обучить научной популяризации.

Оттого, может быть, и низка еще престижность географии в современном обществе, что представляют ее начиная со школьной скамьи на уровне описательной науки XIX в.

И как ни странно, потери престижа географии способствует сам научно-технический прогресс. Зачем углубляться

в сухие учебники по географии, когда можно зайти в специальную цифровую программу, воспользоваться картографическим материалом, отыскать нужный маршрут по навигатору, скачать из Интернета требуемые сведения с чужими суждениями и оценками. И научное содержание из подобных статей выхолащивается, в ущерб многокрасочной визуальной картине преподносится ее бледная мозаично-клиповая копия. Все это не способствует цельному восприятию окружающей среды.

И, наконец, главное. Престиж научной популяризации зависит от самой науки. Будет высоким статус науки в обществе, на соответствующую высоту поднимется и ее пропаганда. Стоило сделать нанотехнологию приоритетным направлением, усилить финансирование, как начали выходить общедоступные книги по этой тематике.

Чтобы быстрее преодолеть скептическое и даже легковесное отношение в обществе к географии, требуется конструктивно-экологическое просвещение, пропаганда новых горизонтов географической науки.

Книга Супруненко — удачная попытка разбудить былой интерес к физической географии, к путешествиям по неизведанным тропам в поисках новых открытий. Они возможны! ■

Методология науки

М.К.Мамардашвили. ОПЫТ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕТАФИЗИКИ. М.: Прогресс-традиция, 2008. 304 с.

Это первая публикация курса вильнюсских лекций выдающегося философа Мираба Константиновича Мамардашвили (1930—1990), прочитанных в июле 1981 г.

«Мало только прочесть данный текст, — заключает его комментатор О.Аронсон, — надо определенным образом обнару-

жить момент соучастия в том, о чем идет речь. И такое усилие требует невероятного замедления понимания, почти невозможного для нашего скоростного и прагматичного времени. Но только вступив в отношения понимания-соучастия, мы получаем шанс увидеть, насколько все то, о чем говорит Мамардашвили, непосредственно связано как с теоретическими, так и с социальными, да и просто с жизненными вопросами...».

Автор рассматривает философию как способ борьбы с ха-

осом, «раскоряченностью» человека между природой и символами, с тем, что Тютчев выразил словами: «на пороге как бы двойного бытия». Напоминает мысль Эйнштейна, что если не верить в простое гармоничное устройство мира, такое устройство, которое имеет смысл и значение, то не стоит заниматься наукой.

Наука, по Мамардашвили, это в значительной мере уход от бессмысленной повторяемости в обыденной жизни, от «духовной тоски». Религия —

тоже «обретение духовного здоровья». Это же можно сказать о культуре и построении социальных утопий.

Автор много размышляет о науке. Страницы книги пестрят именами и высказываниями не только Платона, Гегеля, Канта, Шпенглера и Хайдеггера. Автору интересны и близки многие мысли Ньютона и Лапласа, Колмогорова и Капицы. Чаще других упоминает Эйнштейна. Высоко ставит Карла Маркса за введение понятий «базис», «надстройка», «производственные отношения».

Основная, как говорится, сквозная, тема лекций — это анализ сложной взаимозависимости между устройством общества, его функционированием и мышлением. Из послесловия и воспоминаний мы узнаем, что стенограммы и аудиозаписи лекций были конфискованы КГБ и только многие годы спустя стала возможной их расшифровка, благодаря которой появилась эта книга.

Биология

Н.В.Тимофеев-Ресовский. ГЕНЕТИКА, ЭВОЛЮЦИЯ, ЗНАЧЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ: Лекции, прочитанные в Свердловске в 1964 г. Екатеринбург: Токмас-пресс, 2009. 240 с.

Имя Николая Владимировича Тимофеева-Ресовского (1900—1981), классика в области генетики и других разделов биологии, широко известно за пределами кругов, близких к науке. Д.Гранин сделал его литературным героем, а Н.Сакарян — героем документальной киноэпопеи. В общем, все знают, что это Зубр.

Публикуемые лекции прочитаны для научных работников и аспирантов по их просьбе, накануне отъезда Тимофеева-Ресовского из Свердловска. Собирались после окончания рабочего дня, чтобы не было

нареканий от начальства. Речь в них шла об истории становления генетики, о хромосомной теории наследственности, теории эволюции и перспективах науки. Но главное, вспоминают бывшие слушатели, не научное содержание (в нем не было новых откровений), главное — развитие мысли, щедрое разбрасывание идей. Николай Владимирович уходил от темы, говорил о многом другом, но всегда точно возвращался к оставленной позиции. «Помноженные на ораторский талант, феноменальную эрудицию, великодушное знание русского языка, чувство юмора и величайший уровень культуры Николая Владимировича, эти лекции будут востребованы во все времена», — говорится в предисловии.

География

Н.В.Пинегин. В ЛЕДЯНЫХ ПРОСТОРАХ. ЭКСПЕДИЦИЯ Г.Я.СЕДОВА К СЕВЕРНОМУ ПОЛЮСУ (1912—1914). М.: ОГИ, 2009. 304 с. (Сер. «Путешествия»).

Это книга выдающегося полярного исследователя, автора первого документального фильма об Арктике. Н.В.Пинегин (1883—1940) входил в состав экспедиции Г.Я.Седова на Северный полюс и ярко описал ее.

9 марта 1912 г. офицер Главного гидрографического управления Георгий Яковлевич Седов обратился к начальнику Управления с просьбой об отпуске для достижения Северного полюса. В докладной, в частности, говорится: «Горячие порывы у русских людей к открытию Северного полюса проявлялись еще во времена Ломоносова и не угасли до сих пор. Амундсен желает во что бы то ни стало оставить за Норвегией честь открытия Северного полюса, а мы пойдем в этом году и докажем всему миру, что и русские способны на этот подвиг».

По первоначальному плану Седов собирался выйти из Архангельска 1 июля и, направившись к Земле Франца-Иосифа, зимовать там во взятом с собой доме. Корабль должен был вернуться в Россию. Зимовку предполагалось использовать для естественнонаучных исследований и сбора коллекций. К полюсу Седов намеревался отправиться по плавучему льду на собаках — сразу после окончания полярной ночи: весь светлый период от марта до начала сентября должен быть использован для приближения к полюсу и обратного пути.

Намерение Седова поддержали меценаты. Был организован сбор пожертвований для закупки всех необходимых средств. Благодаря исключительной энергии Седова дело продвигалось. Удалось нанять подходящее судно «Святой мученик Фока». 14 августа 1912 г. «Святой Фока» тронулся в путь.

Седов — сын рыбака из местечка Кривая Коса на Азовском море. Неграмотные родители не собирались учить сына. Он вымолил в 14 лет позволение посещать приходскую школу. Работал приказчиком. Пристрастился к чтению, особенно о путешествиях. Услышал случайно, что в Ростове-на-Дону есть мореходные классы. Тайком сбегал и поступил в эти классы. Зимой учился, а летом нанимался матросом, чтобы скопить денег на зиму. Блестяще окончил учебу, но не мог получить работу штурмана. Наконец нашел место капитана на маленьком черноморском пароходе. Затем отправился в Петроград пробивать себе дорогу. После многих перипетий поручик по адмиралтейству Седов был прикомандирован к Главному гидрографическому управлению. Совершил ряд плаваний. И, получив изрядный опыт, организовал экспедицию к Северному полюсу, о которой подробно и талантливо повествуется в книге.

Была ли нефть в архее?

С.А.Медведев,
кандидат геолого-минералогических наук
Опытно-методическая экспедиция ВСЕГИНГЕО
Московская область

Если вопрос «есть ли жизнь на Марсе?» до сих пор остается риторическим, то проблема нефтегенерации для нас куда ближе и актуальнее. Откуда она взялась, как образовалась и могла ли возникнуть на глубинах 10–20 км? Вопрос не праздный. Если нефть может образовываться лишь из растительных и животных остатков, то все ее месторождения связаны только с кайнозойскими, мезозойскими и палеозойскими отложениями, в крайнем случае — с верхнепротерозойскими. В вендскую и рифейскую эпохи жизнь на нашей планете уже была, причем в виде достаточно крупных организмов и их колоний. Впрочем, в настоящее время нет ни одного месторождения, нефтегенерирующие породы которого древнее кембрия. Находки залежей в гранитах (Вьетнам, Казахстан, Ливия) легко объясняются тем, что углеводороды, «отжатые» из богатых органическим веществом глин, просто не могли никуда деться, кроме трещинных зон гранитных батолитов, прорвавших осадочные толщи и любезно предоставивших свои полости в качестве ловушки.

Тем не менее теоретически почти все соединения, входящие в состав нефтей, могут образовываться при температурах порядка 500–600°C и давлениях около 5–10 тыс. атм, что близко к условиям образования гнейсов и даже к началу гранитизации. Так что если абиогенная нефть все-таки существует, ее можно встретить и в архейских породах (впрочем, давно доказано, что жизнь на Земле появилась в раннем архее — ей не менее 4 млрд лет). Заманчивая перспектива! В таком случае обьемы нефти в земной коре могут оказаться на порядок или даже два выше, чем расчетные, опирающиеся на биосферный генезис всех залежей углеводородного сырья.

Так или иначе, но мне в 2004–2005 гг. посчастливилось принять участие в попытке обнаружить залежь черного золота в протерозойских и архейских породах Кольского п-ова. Здесь в течение 2004–2009 гг. были пробурены две глубокие скважины (5200 и 3001 м), прошедшие по 1000–1100 м по метаморфизованным осадочным породам протерозоя и 2–4 км уже по кристаллическим породам фундамента Кольского щита.

Увы, нефти там не было, как и следовало ожидать. Бурение лишь заметно пополнило копилку



На буровой.

Фото автора

наших представлений и знаний о геологическом строении севера Кольского п-ова, но не более того! Выяснилось, что обе скважины сухие и почти стерильны в плане органического вещества. Отмечено было лишь локальное повышение содержания водорода — иногда в 100–200 раз по сравнению с фоном (пределом чувствительности газового хроматографа), что косвенно подтвердило наличие «водородного дыхания» Земли. И еще один интересный результат — полное несоответствие данных глубинного сейсмического зондирования и вертикального электропрофилеирования истинному разрезу: геофизика «дала» мощность осадочной толщи в точках бурения не менее 5 км. Оказалось — не более одного... ■

Правила для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Поскольку статьи адресуются неспециалистам, желающим знать, что происходит в смежных областях науки, суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Без предварительной апробации научным сообществом статьи не принимаются, а принятые к публикации в «Природе» рецензируют-

ся и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию статьи можно прислать по электронной почте прикрепленными файлами или на любом из следующих носителей: компакт-дисках CD-R или CD-RW; дисках DVD+R или DVD+RW; дисках Zip 100 Mb; на устройствах, поддерживающих USB. Для сжатых файлов необходимо представить свой архиватор. Самораспаковывающиеся архивированные файлы не принимаются.

Текст статьи, внутри которого библиографические ссылки нумеруются по мере цитирования, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате MS с расширением doc, txt или rtf. Иллюстрации присылаются отдельными файлами. Если пере-

сылаемый материал велик по объему, следует архивировать его в формат ZIP или RAR.

Принимаются растровые изображения в форматах: EPS или TIFF — без LZW-компрессии. Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (B/W, Bitmap) — не менее 800 dpi. Принимаются векторные изображения в формате COREL DRAW CDR (версии 9.0—11.0) и Adobe Illustrator EPS (версий 5.0—8.0).

Редакция высылает автору статью для согласования только в виде корректуры. Все авторские исправления необходимо выделять цветом, курсивом, полужирным шрифтом и т.д. и не трогать формулы и специальные символы (греческие буквы, математические знаки и т.п.), в которых ошибки не допущены.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Е.Е.БУШУЕВА
М.Ю.ЗУБРЕВА
Г.В.КОРОТКЕВИЧ
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Г.С.ДОРОХОВА

Перевод:
С.В.ЧУДОВ

Набор:
Е.Е.ЖУКОВА

Корректоры:
М.В.КУТКИНА
Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:
А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

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

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 17.08.2009
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать, усл. печ. л. 10,32,
усл. кр.-отт. 67,8 тыс., уч.-изд. л. 12,2
Заказ 576
Набрано и сверстано в редакции

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