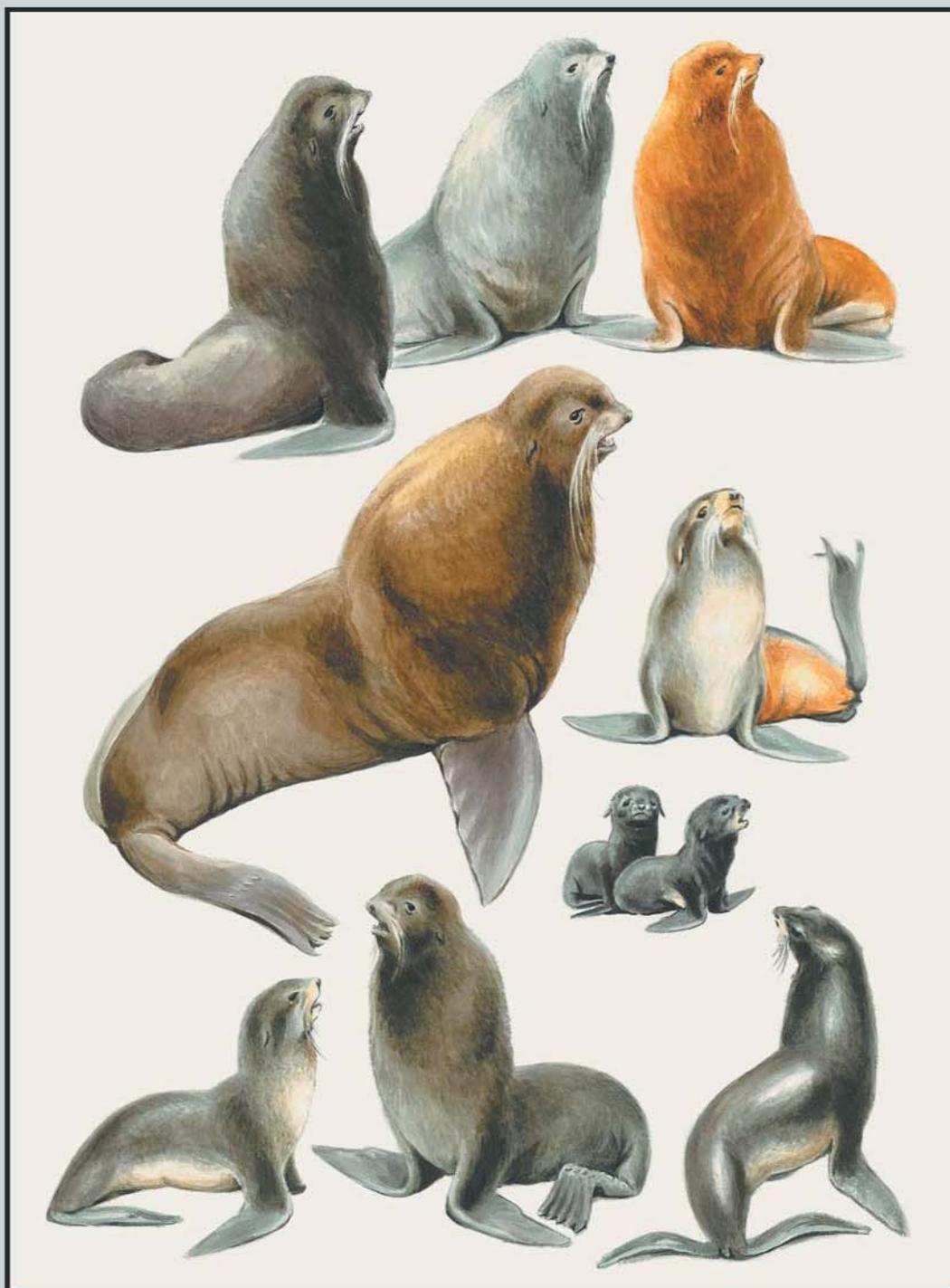


# ПРИРОДА

4 10



**В НОМЕРЕ:****3 Смирнов Г.Б.**  
**Повторы в геномах бактерий и в жизни**

*Копии некодирующих последовательностей — повторы — занимают в геноме человека почти половину молекулы ДНК. Интересно, что повторы широко встречаются и в повседневности — как важный элемент обучения и воспитания и как излюбленный прием в искусстве.*

**12 Шевченко И.И.**  
**Непредсказуемые орбиты**

*Динамический хаос в движении тел Солнечной системы — астероидов, комет, планет, спутников планет — проявляется в том, что на интервалах времени много больше так называемого ляпуновского их движение становится непредсказуемым. Современная теория позволяет оценить эти интервалы времени.*

**22 Еремин В.В.**  
**Искусственный фотосинтез — путь к «чистой» энергии**

*Потребности человечества в энергии растут в геометрической прогрессии, а энергетика, как известно, базируется на топливе, продукты окисления которого выбрасываются в атмосферу и влияют на климат. Поэтому особое значение приобретают «чистые» источники энергии, не поставляющие в земную атмосферу парниковых газов.*

**29 Воротников А.В., Кубасова Н.А., Цатурян А.К.**  
**Молекулярный мотор мышц**

*Несмотря на свои микроскопические размеры по сравнению с рукотворными двигателями, актомиозиновый мотор значительно превосходит их по эффективности. Знание физиологических механизмов регуляции активности таких моторов способствует развитию новой фармакологической терапии сердечно-сосудистых заболеваний.*

**37 Захаров В.А.**  
**Бореальный климат в мезозое**

*В мезозое, самой теплой эре в фанерозойской истории Земли, в течение 180 млн лет не было устойчивого ледяного покрова даже в приполярных областях. Тем не менее существовала климатическая зональность и постоянно происходили колебания наземного тепла и температуры вод морей и океанов.*

**43 Наугольных С.В.**  
**На поиски меловых палеопочв, или По следам игуанодона****Заметки и наблюдения****49 Булавинцев В.И.**  
**Птица-невидимка****Апрельский факультатив****51 Расцветаева Р.К.**  
**Дружба народов (51)****Комаров В.Н.**  
**Парадоксы корнепластики (57)****Иванова-Казас О.М.**  
**Перевоплощения Лернейской Гидры (58)****Самец размножился!**  
**Из научных тактатов (62)****О чем писала «Природа»****63 Лазарев П.П.**  
**Памяти великого русского физика П.Н.Лебедева (63)****Лазарев П.П.**  
**Взгляды П.Н.Лебедева на организацию научных исследований (66)****Болотовский Б.М.**  
**Петр Петрович Лазарев (71)****74 Новости науки**

*Алькор — двойная звезда. Вибе Д.З. (74). Манипуляция магнитными вихрями в сверхпроводнике (75). Гибкие углеродные трубки большого диаметра (75). Вымирание медоносных пчел (76). Комодский дракон ядовит. Семенов Д.В. (76). На пути к новым кардиопрепаратам (77). Углеводородный потенциал отложений Южного Сахалина (78). О чем говорят пещерные натеки на Майорке (78). Колебания уровня Аральского моря (78). Реакция вечной мерзлоты на потепление (79). Как быстро «бегает» деревья? Лаухин С.А. (80).*

**Рецензии****81 Гиляров А.М.**  
**«Мир зверей — самое прекрасное, что существует на Земле...»**  
(на кн.: Смирин В.М. Портреты зверей Командорских островов; Смирин В.М. Портреты степных зверей Европы и Северной Азии)**89 Новые книги****В конце номера****90 Жидков М.П.**  
**Голконда — форт сокровищ**

**CONTENTS:****3 Smirnov G.B.****Repeats in Bacterial Genomes and in Life**

*Copies of non-coding sequences – repeats – comprise almost half of DNA molecule in human genome. Interestingly, repeats are abundant in everyday life as important element of training and upbringing and as a favorite trick in art.*

**12 Shevchenko I.I.****Unpredictable Orbits**

*Dynamic chaos in motion of solar system bodies – asteroids, comets, planets, planetary satellites, – manifests itself in loss of predictability of their motion on the time intervals much greater than so called «Lyapunov time». Modern theory allows one to estimate these time intervals.*

**22 Eremin V.V.****Artificial Photosynthesis – a Road to «Clean Energy»**

*Humankind's demand in energy grows exponentially, and energy production, as everybody knows, is based on fuels whose combustion products are released into atmosphere and influence climate. That is why «clean» energy sources that do not release greenhouse gases into atmosphere become especially important.*

**29 Vorotnikov A.V., Kubasova N.A., Tzaturyan A.K.****Molecular Motor of Muscles**

*In spite of their microscopic dimensions compared to artificial engines, actin-myosinic motors significantly excel the latter in efficiency. Knowledge of physiologic mechanisms of regulation activity of such motors contributes to development of new pharmacological therapies of cardiovascular diseases.*

**37 Zakharov V.A.****Boreal Climate in Mesozoic**

*During Mesozoic, the warmest epoch in Phanerozoic, for 180 million years there were no stable ice cover even in polar regions. Nevertheless, the climate zones existed and oscillations of land and sea surface temperatures took place.*

**43 Naugolnykh S.V.****In Search of Cretaceous Paleosoils, or Following in the Tracks of Iguanodon****Notes and Observations****49 Bulavintsev V.I.****Invisible Bird****April Lectures****51 Raszvetaeva R.K.****Friendship of Nations (51)****Komarov V.N.****Paradoxes of Cornea Plastic Surgery (57)****Ivanova-Kazas O.M.****Reincarnations of Lernean Hydra (58)****The Male Had Been Procreating! (62)****What «Priroda» Wrote About****63 Lazarev P.P.****In Memoriam of a Great Russian Physicist P.N.Lebedev (63)****Lazarev P.P.****P.P.Lebedev's Views on Organization of Research Activities (66)****Bolotovskiy B.M.****Petr Petrovich Lazarev (71)****74****Science News**

Alcor – a Double Star. **Wiebe D.Z.** (74). Manipulation by Magnetic Vortices in Superconductor (75). Flexible Large Diameter Carbon Nanotubes (75). Dying out of Melliferous Bees (76). Komodo Dragon Is Poisonous. **Semenov D.V.** (76). On the Way to New Cardiac Drugs (77). Hydrocarbon Potential of Southern Sakhalin (78). What Dripstone Incrustations in Majorca Caves Tell (78). Oscillation of Aral Sea Level (78). Reaction of Permafrost to Warming (79). How Fast Trees «Run»? **Lauhin S.A.** (80)

**Book Reviews****81 Ghilyarov A.M.****«Animal world is the most beautiful thing existing on the Earth...»**

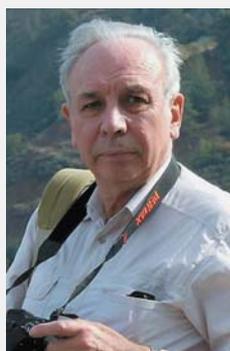
(on a book: V.M.Smirin. Portraits of the Beasts on Commodore Islands; Portraits of Steppe Beasts of Europe and Northern Asia)

**89****New Books****In The End Of The Issue****90 Zhidkov M.P.****Golkonda – Fort of Treasures**

# Повторы в геномах бактерий и в жизни

Г.Б.Смирнов

Структуру ДНК открыли чуть более полувека назад, но написано об этой полимерной молекуле гораздо больше, чем о любых других молекулах. ДНК содержит генетическую информацию обо всех свойствах клетки, вируса, организма, т.е. это генетический текст-инструкция, способный к полному (репликация) или частичному (транскрипция) копированию. Для того чтобы кодировать все свойства клетки (организма), нужно довольно много генов. Так, в типичной бактериальной клетке около 4 тыс. генов, а в клетке человека, по современным оценкам, их около 30 тыс. В геноме бактерии примерно 4 млн нуклеотидных пар (н.п.), т.е. на каждый ген их приходится около 1 тыс., что соответствует прямому определению количества пар оснований в бактериальных генах. Значит, геном бактерий плотно заполнен генами. В геноме человека 3.3 млрд пар оснований, поэтому на каждый ген приходится около 100 тыс. н.п. Но по размерам гены человека практически не отличаются от бактериальных, значит, в геноме человека они занимают всего 1.5%! Примерно 50% составляют повторы, и почти столько же — ДНК, в тексте которой смысл не просматривается. Что такое повторы? Коль скоро мы приняли последовательность оснований ДНК за текст, представим, что при его наборе компьютер стал оши-



**Георгий Борисович Смирнов**, член-корреспондент РАН, профессор, руководитель отдела генетики и молекулярной биологии бактерий Научно-исследовательского института эпидемиологии и микробиологии им.Н.Ф.Гамалеи РАН. Область научных интересов — молекулярная биология и генетика микроорганизмов.

баться и печатать «лалалалала» или «торггрот» или время от времени вставлять такие сбои в нормальный текст. Примерно то же самое имеет место в генетических текстах, только типов повторов в них гораздо больше, чем можно себе представить. Повторы есть и в компактных бактериальных геномах, только их меньше, чем у высших организмов, эукариот.

Сегодня обнаруженных в бактериальных геномах разновидностей повторов столь много, что здесь нет смысла их даже перечислять [1]. Выделим лишь их основные классы: *по ориентации частей повторов* — прямые (DR) и обращенные, или инвертированные (IR), разновидность которых — палиндромы (рис.1—3); *по длине* — короткие (SSR) и длинные (LR или LTR); *по расположению относительно генов* — прилежащие, или смежные (одна из разновидностей — тандемные, TR), и диспергированные (рис.1, 4); *по расположению относительно генов* — внутригенные (intragenic) и межгенные (intergenic); *по степени связи с другими структурами* — автономные, или диспергированные (рис.4), и связанные с генами или элементами. И наконец, повторы могут быть кодирующими (например, повторы генов и других транскрибируемых элементов) и некодирующими.

## Повторы в жизненном цикле бактерий

Почти все события, которые происходят в ДНК и с ДНК, осуществляются с помощью белков. Для начала или окончания какого-либо молекулярно-генетического процесса они должны вступить во взаимодействие с ДНК. Это взаимодействие происходит не по всей длине этой молекулы, а в специфических точках (сайтах), которые

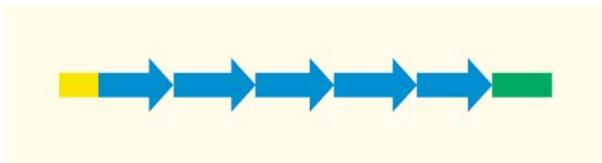


Рис.1. Тандемные повторы (синие стрелки).

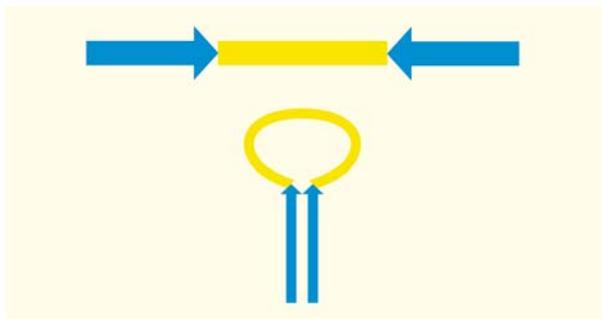


Рис.2. Инвертированные повторы (синие стрелки), разделенные спейсером (желтая зона). Внизу — образование структуры типа «стебель-петля» на однонитевой ДНК.

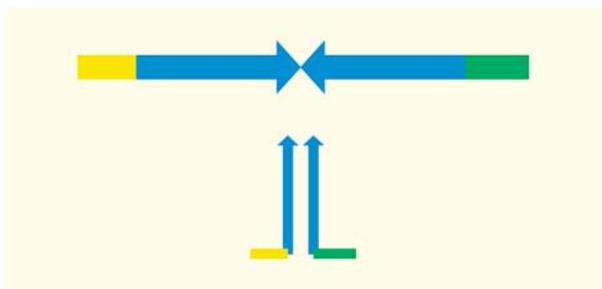


Рис.3. Схема палиндрома, его части показаны синими стрелками. Внизу — образование структуры типа стебель (шпилька) на однонитевой ДНК.

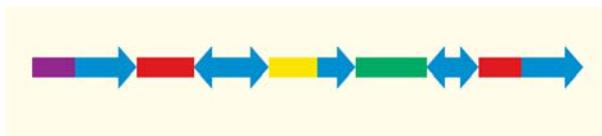


Рис.4. Диспергированные повторы (синие стрелки); разноцветные прямоугольники — кодирующая ДНК (спейсеры).

белки должны отличить от других сайтов ДНК по каким-то признакам. Как выяснилось, такими признаками и служат повторы. Какую же роль они играют в осуществлении основных функций ДНК — репликации, транскрипции и рекомбинации?

Бактериальную ДНК (геном) по аналогии с хромосомами эукариот часто называют бактериальной хромосомой. Она, в отличие от эукариотических хромосом, не линейная, а кольцевая.

Репликация начинается в определенной точке *oriC* (от англ. origin — начало) и продолжается в обоих направлениях. Когда все кольцо удвоится, обе вилки встретятся в точке *terC* (от англ. terminus — окончание) и образовавшиеся идентичные копии разойдутся каждая в свою дочернюю клетку.

В репликации участвует сложный репликативный комплекс белков: DnaA, HU, IHF, Fis, DnaC, DnaB, SSB, ДНК-гираза, DnaG и PolIII. Сначала с *oriC* связывается иницирующий белок DnaA, который узнает этот сайт по повторам. Например, у *E.coli* в *oriC* присутствуют пять так называемых R-боксов, состоящих из 9 н.п. каждый, и три АТ-богатых повторов из 13 н.п. (рис.5). Две пары находятся в противоположной ориентации относительно друг друга. Такой же R-бокс найден в промоторе белка 16 кДа, ген которого сцеплен с *oriC*, и в промоторе гена *dnaA*, находящегося в том же районе и кодирующего белок DnaA. Белок 16 кДа, также необходимый для инициации репликации ДНК, ответствен за ее двунаправленность. Связывание белка DnaA с R-боксами стимулирует частичную денатурацию ДНК в районе АТ-богатых повторов из 13 н.п. После образования одноцепочечных участков с АТ-богатыми повторами связываются геликаза DnaB и белок DnaC. В этом месте формируется репликативный комплекс и начинается репликация ДНК.

В окончании репликации также участвуют повторы. У *E.coli* имеется несколько сайтов *terC*, которые выглядят как 5'-(А или Т) ТТАГТТАСААСАТ (А или С) СТ (А или Т) (А или Т) (А или Т) Т-3': *terC1* блокирует вилку репликации, движущуюся против часовой стрелки, а *terC2* и *terC3* — идущую по часовой стрелке. У многих видов бактерий в хромосомах и плаزمиде сайты *terC* гомологичны (последовательности консервативны) и представлены в виде инвертированных повторов [2]. Итак, точки начала и окончания репликации ДНК обозначены для белков репликативного комплекса повторами нуклеотидных последовательностей ДНК.

Каковы опознавательные знаки для начала и окончания экспрессии генов — транскрипции? Осуществляющий ее фермент, РНК-полимераза, сначала связывается с двухкомпонентной последовательностью — промотором. В самом промоторе, который состоит из -35 и -10 последовательностей и находится перед считываемым геном, повторов нет. Однако один и тот же ген может экспрессироваться более или менее активно, что во многих случаях зависит от белков — положительных регуляторов.

Так, перед промотором оперона, кодирующего холерный токсин, обнаружены тандемные прямые повторы: ТТТТГАТ. У *V.cholerae* E1 Tox и у большинства штаммов классического биотипа их только три копии, а у штамма *V.cholerae* 569В таких повторов семь. Этот штамм продуцирует в 100 раз больше холерного токсина, чем другие,

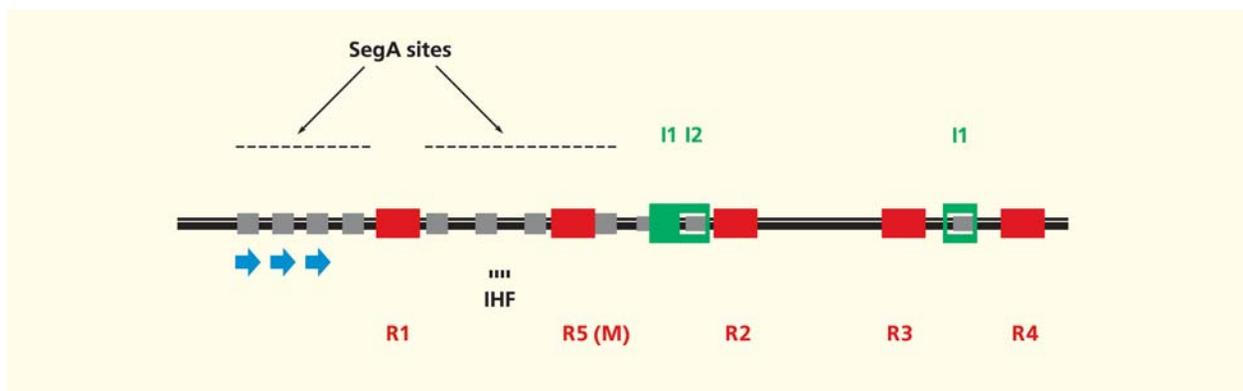


Рис.5. Повторы в сайте *oriC* *E. coli*; R-боксы — красные прямоугольники R1—R5; голубые стрелки — AT-богатые 13-членные последовательности; *SeqA* — белок, предотвращающий реинициацию репликации вновь синтезированной ДНК. Серые прямоугольники — сайты метилирования GATC. Зеленые прямоугольники — сайты связывания с комплексом DnaA-ATP. IHF — Integration Host Factor.

поскольку прямые повторы распознаёт регуляторный белок *ToxR*, обладающий свойствами активатора и сенсора. Наличие семи копий прямых повторов обеспечивает образование активного димера этого белка и полноценную активацию транскрипции [3].

Существует два основных способа окончания транскрипции (терминации): при участии белка-терминатора *Rho* и без такового. В последнем случае РНК-полимераза в ходе транскрипции доходит до обращенного повтора, формирующего стебель (например, такого, как 5'CCCACT...AGTGGG3'), и во вновь синтезированной РНК появляется

структура «стебель-петля», что приводит к остановке транскрипции (рис.6). На месте частичной денатурации ДНК вновь синтезированная нить РНК отсекается рибонуклеазой (РНКазой). Механизм *Rho*-зависимой терминации изучен хуже, и мы не будем здесь на нем останавливаться.

Интересно, что повторы могут не только активировать или останавливать, но и ослаблять (аттенуировать) транскрипцию. Механизм ослабления принципиально схож с таковым для *Rho*-независимой терминации (рис.6). Аттенуация (от лат. *attenuato* — ослаблять) связана с узнаванием структур типа «стебель» или «стебель-петля». Од-

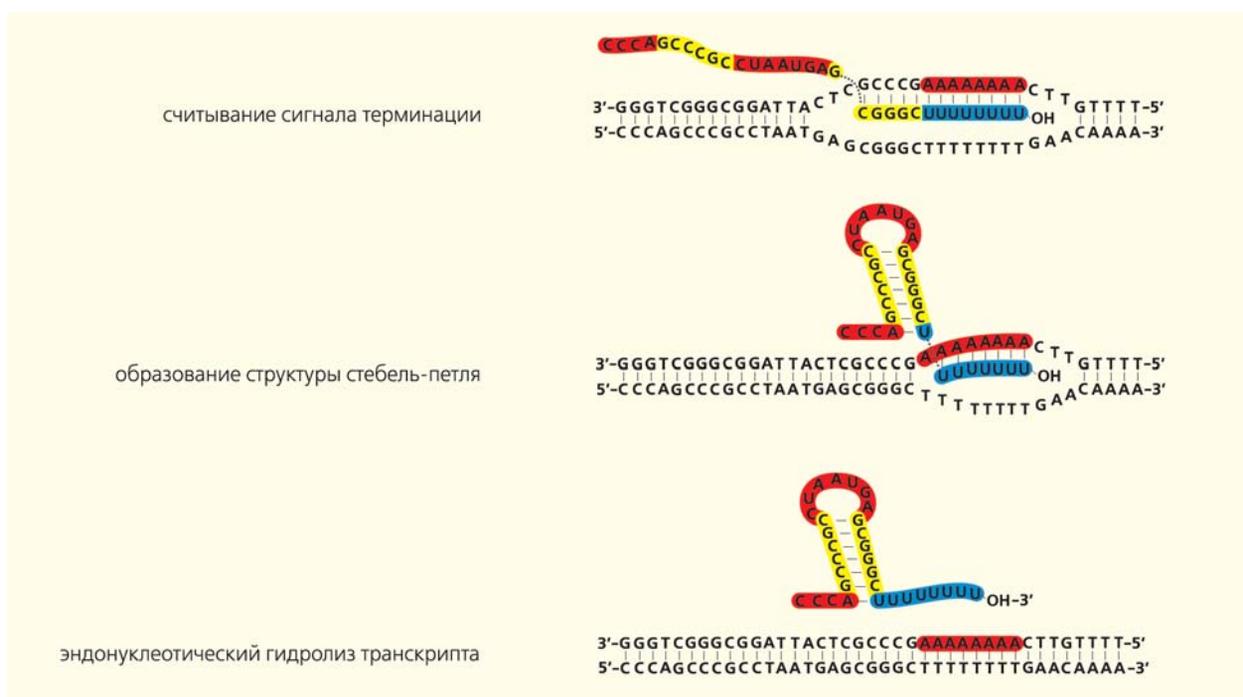


Рис.6. Терминация транскрипции.

нотяжевая молекула мРНК, транскрибированная с недалеко отстоящих друг от друга обращенных повторов, образует стебель с ножкой до 50 н.п. Эту структуру узнает РНКаза III, которая делает надрез и отсекает дистальную часть оперона. Стебли с петлями формируются только при активной трансляции и, соответственно, избытке конечного продукта (например, аминокислоты). Аттенуаторы — структуры типа «стебель-петля» (рис.2) в лидерной области мРНК, блокирующие дальнейшую транскрипцию. Гены, имеющие между промотором и началом считывания обращенный повтор, копируются намного менее эффективно, чем те, в которых после промотора повторов нет.

Транскрипция гена может быть блокирована в самом начале, еще до инициации. Так происходит в катаболических системах, ферменты которых утилизируют источники энергии, например углеводы. Останавливает транскрипцию репрессор — несколько объединенных друг с другом белковых молекул. Они связываются с участком ДНК, находящимся перед соответствующим геном, и транскрипция блокируется. Происходит это тогда, когда нечего утилизировать и, соответственно, катаболические ферменты не нужны. Участок ДНК, с которым связывается репрессор, называется оператором. В геномах бактерий и у бактериофагов в большинстве случаев операторы — палиндромы (рис.3) или близкие к ним последовательности. Иногда эти палиндромы дублированы, и тогда они представляют собой прямые повторы.

Таким образом, инициация транскрипции, ее репрессия, аттенуация и терминация, так же, как и все стадии репликации ДНК, зависит от присутствия в ДНК инвертированных повторов, но в некоторых случаях активацию транскрипции обеспечивают прямые повторы.

## Роль повторов в рекомбинации

Еще очевиднее роль повторов в генетической рекомбинации. Существует три больших класса рекомбинационных событий: гомологичная, или RecA-зависимая; RecA-независимая, или незаконная; и сайт-специфическая рекомбинация. Первая оперирует на гомологичных нуклеотидных последовательностях и осуществляет обмены фрагментами геномов бактерий одного и того же вида или близкородственных. Вторая работает независимо от степени гомологии и потому возможна при горизонтальном переносе (между организмами, принадлежащими различным видам, родам, семействам и даже более крупным таксонам). В ряде случаев незаконная рекомбинация имеет общие черты с сайт-специфической рекомбинацией, которая также не требует гомологии, но нуждается в наличии в реципиентной ДНК специфических сайтов, определяющих места внедре-

ния донорских структур. У бактерий *E.coli* гомологичная рекомбинация, в норме осуществляемая ферментами системы RecBCD, зависит от присутствия в ДНК многочисленных диспергированных октамеров 5'-GCTGGTGG-3', обозначаемых греческой буквой  $\chi$  (в англоязычных статьях часто —  $\chi$ ). У бактерий разных видов последовательности  $\chi$  отличаются, т.е. они эволюционировали независимо.

Наличие повторов способствует и RecA-независимой рекомбинации, причем ее вероятность повышается, если повторы расположены недалеко друг от друга. Есть также прямая зависимость между размером повтора и вероятностью рекомбинации. Увеличение расстояния между повторами (размера спейсера), которое достигается за счет транспозиций (внедрения генетического материала между повторами) и других геномных перестроек, приводит к их стабилизации. Частота делеций, стимулируемых повторами, прямо пропорциональна их размеру и обратно пропорциональна длине спейсера, поэтому для стабилизации повторов расстояние между ними должно быть тем больше, чем они сами длиннее [4].

Повторы служат «горячими точками» геномных перестроек, вовлекающих крупные сегменты генома, — инверсий, делеций, дупликаций и транслокаций. Прямые повторы обычно стимулируют делеции, дупликации и транслокации, а обращенные — инверсии. Диспергированные повторы (рис.4) относительно беспорядочно разбросаны по длине молекулы ДНК, разнообразны по нуклеотидным последовательностям, размеру, количеству копий и самому наличию в геномах бактерий. Такие повторы могут быть местом встраивания для мобильных элементов. Так, в геномах различных микроорганизмов предпочтительными сайтами узнавания для транспозаз (ферментов, участвующих в транспозиции) оказались внегенные повторяющиеся палиндромы REP (Repetitive Extragenic Palindromes).

Кроме диспергированных существуют повторы, организованные в определенные структуры. Например, повторы, входящие в состав мобильных элементов, сайтов интеграции геномов умеренных бактериофагов и принадлежащих интегронам или сцепленным с генами тРНК. Именно такие повторы обеспечивают сайт-специфическую рекомбинацию [1]. Обычно общая схема их строения выглядит следующим образом: левый элемент повтора — уникальная часть — правый элемент повтора (рис.2, 7). Чаще всего элементы, построенные по такой схеме, содержат повторы в обратной ориентации.

В последние годы обнаружены и интенсивно изучаются генетические элементы, получившие названия *генные кассеты*, *интегроны* и *острова патогенности*. Они также способны к перемещениям (либо обладали таким свойством в прошлом). Для нас наиболее актуальны острова пато-

генности — более крупные, чем транспозоны, и содержащие блоки генов, кодирующих патогенность бактерий. Часть островов ограничена повторами известных мобильных элементов типа IS, а у других на концах имеются остатки повторов. Все острова патогенности попадают в ДНК за счет механизмов, сходных с таковыми для внедрения транспозонов, которые способны к перемещению в пределах генома или между геномами и не требуют гомологии между донорной и реципиентной последовательностями ДНК. Однако большая часть островов внедряется в гены, кодирующие tPHK. В этом, безусловно, просматривается глубокий эволюционный смысл. Гены, кодирующие tPHK, имеют консервативные последовательности, очень сходные или идентичные у различных видов бактерий; кроме того, часто в геноме их множество копий, т.е. эти гены служат надежной мишенью для интеграции. В настоящее время изучено много островов патогенности [5]. Например, у возбудителя чумы *Yersinia pestis* есть остров патогенности (102 тыс. н.п.), ограниченный прямыми повторами инсерционной последовательности IS100, которая непосредственно участвует во внедрении острова и в его утрате (с частотой около  $10^{-4}$ ).

Итак, гены, кодирующие определенные свойства, организованы в различные блоки или модули, которые благодаря структурным (фланкирующие повторы) и функциональным особенностям могут перемещаться не только в пределах одного генома, но и при горизонтальном переносе [6]. В настоящее время очевидно, что геномы живущих сейчас микроорганизмов — сборные структуры, включающие информационные блоки различного происхождения, которые образовались в результате собственной независимой эволюции. Значит, в эволюционном плане геномы современных микроорганизмов намного моложе, чем входящие в них блоки генетической информации.

Материал, который мы обсудили, показывает, что повторы — ключевые элементы генетической структуры, благодаря которым осуществляется не только жизненный цикл каждой клетки (онтогенез), но и адаптивные реакции, и потенциально-эволюционные изменения (рекомбинационные события).

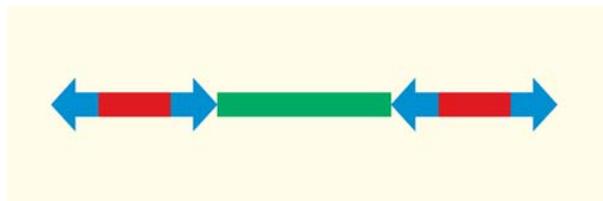


Рис.7. Обращенные повторы, фланкирующие уникальную часть. Красные участки — длинные повторы, ограниченные короткими повторами (синие стрелки); зеленый участок — уникальная часть.

## Повторы вокруг нас

Насколько уникальны все рассмотренные нами типы повторов? Присущи ли они только генетическому материалу? Конечно, нет. Мы хорошо знаем орнаменты, основанные на использовании повторов. Например, в древнеегипетских орнаментах присутствуют тандемные повторы и повторы двух и более элементов, чередующиеся друг с другом (рис.8). В античном (рис.9) и древнерус-



Рис.8. Древнеегипетские орнаменты.



Рис.9. Фрагмент античного орнамента. Повторы, фланкирующие центральную уникальную часть.



Рис.10. Фрагмент древнерусского орнамента. Вверху — палиндромы. Внизу — инвертированные повторы, фланкирующие уникальную часть.

ском (рис.10) орнаментах есть повторы, ограничивающие центральную уникальную область (рис.2), а также палиндромы (рис.3). Те же виды повторов используются и сегодня для украшения деревянных домов (рис.11, 12), а также во многих произведениях прикладного искусства.

Орнамент, построенный на основе обращенных повторов или палиндромов, выглядит как

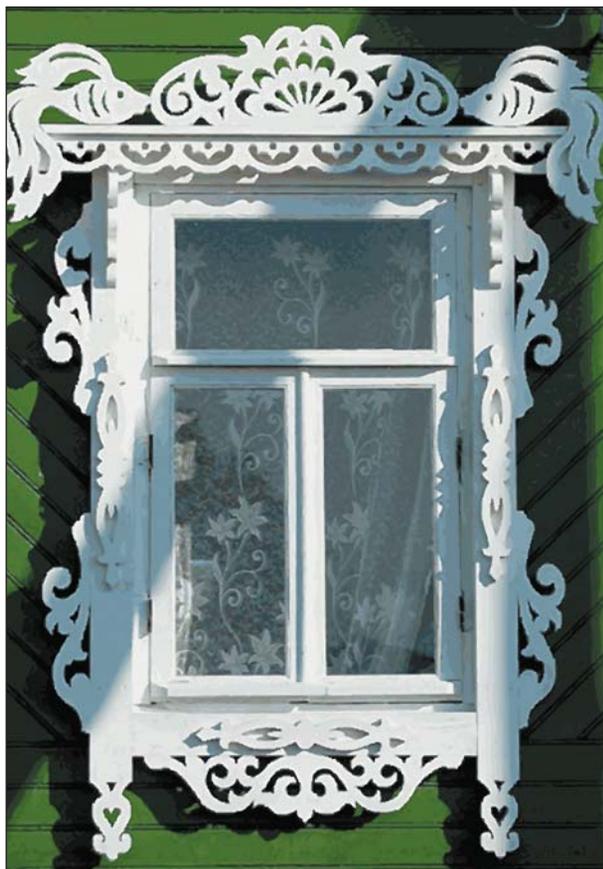


Рис.12. Различные виды повторов в домовой резьбе.



Рис.11. Домовая резьба. Вверху — инвертированные повторы, фланкирующие центральную, уникальную, часть; внизу — палиндром.

более сбалансированный, стабильный, законченный и, следовательно, более приятный, чем орнамент из прямых повторов — следующих один за другим тандемов. В мире геномов палиндромы стабильны, а длинные тандемы обычно нестабильны, так как распознаются системами гомологичной рекомбинации и могут удаляться сами или способствовать удалению одной из копий повтора вместе с генетическим материалом, заключенным между ними. Этот механизм позволяет клетке избавиться от дубликаций и вернуться к исходному состоянию, если она (клетка) имеет возможность удалить дополнительный груз и не может немедленно применить его для своей пользы.

Случайны ли совпадения в принципиальной структуре элементов геномов и орнаментов? До сих пор мы пользовались очень простыми примерами. Обратимся теперь к несколько более сложным аналогиям. Вот известная нам схема структуры транспозона  $Tn5$  (рис.7). Центральная уникальная часть фланкирована длинными повторами (прямыми или обращенными); концы длинных повторов также ограничены повторами со своими осями симметрии, но только короткими. Такая схема справедлива не только для транспозона, но и для генома ретровируса, включая вирус иммунодефицита человека (ВИЧ). Это не совпадение, это закон. Почти та же структура характерна для сегмента PD, обеспечивающего антигенные вариации сальмонелл, стратегию геномов совершенно не родственных фагов Mu и P1.

Та же схема просматривается в структуре старинной классической музыкальной формы, которая называется *музыкальное приношение*. Короткие повторы, ричеркар (от итал. ричеркаре — искать), использовались композиторами фламандской и венецианской школ. В конце XVI — начале XVII в. ричеркар был преобразован в фугу — жанр, известный нам прежде всего благодаря И.С.Баху.

Длинные повторы — это *пять канонов*, а уникальная центральная часть — *трио соната*. Каждая из пяти частей имеет внутреннюю ось симметрии. Так схема построения музыкального приношения идентична структуре некоторых транспозонов (рис.7). Значит, в принципе можно послушать, как звучит ретровирус или транспозон. Внутренняя симметрия канонов напоминает различные орнаменты, которые мы видим повсеместно. По тому же принципу построены многие композиции классического джаза: тема в начале и в конце, а в середине — уникальная часть, представленная импровизациями каждого из членов джазового коллектива. Такое построение идентично схеме строения транспозона Tn9, у которого центральная уникальная часть ограничена прямыми повторами элемента IS1 (рис.13). Другими словами, генетические структуры, орнаменты и произведения некоторых музыкальных жанров построены по одному принципу.

Мы подошли к мысли, что структурные принципы, основанные на повторах и используемые на разных уровнях биологической организации, применяются и при создании произведений искусства.

Как образуются повторы? На бумаге это делается с помощью операций симметрии, называемых *поворот, отражение, трансляция* (но не та, с помощью которой текст РНК переводится в текст белка). В ДНК живой клетки есть гораздо больше возможностей сформировать различные повторы, и механизмы этих процессов достойны отдельного обсуждения. Один из процессов, имеющий значение для нашей темы, — это поворот на 180°, или отражение. Используя эту операцию, мы получаем обращенный повтор, а с помощью трансляции — диспергированные прямые повторы.

Мы уже знаем, что определенные структуры на молекулярном уровне узнаются ферментами, участвующими в репликации, рекомбинации и транскрипции. Эти структуры необходимы ферментам для того, чтобы найти стартовую точку и распознать субстрат.

На существенно более высоком уровне в тех же самых структурах нуждается человеческий интеллект. Один из основных элементов в интриге литературных произведений — перипетия. Термин, введенный Аристотелем, в дословном переводе с греческого означает «неожиданный поворот», т.е. операция, создающая новую фигуру симметрии. Перипетия — переосмысление, а переосмысление требует повтора, поэтому повторы — элементы интриги.

Если ненадолго отвлечься, можно найти ту же мысль и в языке, например английском. По-английски научное исследование — *research*. Это слово состоит из двух частей: *search* — поиск, но *research* — это поиск заново, поиск того, что уже было когда-то, но потом потерялось. Значит ко-



Рис.13. Схема строения транспозона Tn9. Синие стрелки — прямые повторы IS1, бордовый участок — центральная, уникальная, часть.

му-то давно, а может быть, всегда, было известно то, что мы ищем, исследуем, т.е. мы повторяем. Да и по-русски исследование — это путь по следу. По чьему следу?

Повторы — один из важнейших элементов и в поэзии, например, повторы строчек или куплетов, припевы в народных и не только народных песнях. Но главное — в структуре самого стиха, который не просто созвучие, а повтор, возврат к уже сказанному слову. Это внезапность, перипетия, т.е. внезапное осознание похожести одного слова с другим, со словом, звучащим похоже, но имеющим другой смысл. Помните, как у К.Бальмонта, когда он пишет о своей поэзии: «Я внезапный излом...» или «Переплеск многопенный, разорванно-слитный...». Вот вам и внезапность, и повторяемость. И когда все это есть (а у него это есть), автор имеет право сказать: «Я изысканный стих!».

На языке молекулярной биологии рифма — это повтор с несовершенной гомологией, где одна копия незначительно отличается от другой. Но такое незначительное отличие в структуре ведет к существенному различию в функции, в смысле — совсем как в случае с рифмами.

Мы это видим опять-таки на примере структуры транспозонов (рис.7). Левый обращенный повтор Tn5 содержит промотор гена, кодирующего устойчивость к канамицину, и отличается от правого повтора заменой одной пары оснований. В терминах структуры такая замена равноценна замене буквы в словах «день—тьень—пень—лень» и т.п., только слова у транспозона состоят из полутора тысяч букв. Но дело в том, что замена всего одной буквы в левом обращенном повторе создает охра-кодон — сильный терминатор трансляции. В результате этот повтор, во-первых, не способен кодировать транспозазу (функция сохранена у правого IR); и, во-вторых, способствует экспрессии гена для неомицинфосфотрансферазы, чья кодирующая последовательность начинается сразу за внутренним концом левого IR. Другими словами, смысл левого и правого повторов очень различается, как у слов, образующих рифму.

Однако вернемся к прозе. Что повторяется в тексте без рифм? Обстоятельства. Проза возвращает события к их корням, события повторяются, как будто человек возвращается к какой-то точке

своей жизни. Об этом очень красиво, правда, в стихах, сказал Б.Пастернак:

*Так пел я, пел и умирал,  
И умирал, и возвращался  
К ее рукам, как бумеранг,  
И — сколько помнится — прощался.*

В повседневной жизни мы все фотографируем и фотографируемся, а теперь и снимаем на видео, чтобы вернуться к прежним событиям или просто временам. В.Шкловский сказал: «Повторы — рифмы прозы». Приведу несколько простых примеров. Гамлет, чтобы завладеть сознанием короля, с помощью бродячих актеров воспроизводит сцену преступления Клавдия, привязывая его тем самым к зеркальному отражению содеянного. Этот прямой повтор — что-то вроде следственного эксперимента. Есть и более сложные примеры, где используются операции симметрии. Например, Л.Толстой знакомит Вронского с Анной в поэзде. С этого момента начинается история трагической любви. Любовь и жизнь Анны заканчиваются под колесами поезда.

Такие повторы можно увидеть и в первой и последней песнях «Илиады» Гомера. Через всю поэму проходят различные события, связанные с предчувствиями и воспоминаниями персонажей и повторяющимися пассажами их высказываний. Элементы соответствия, ассоциации, повторно встречающиеся персонажи заполняют содержание «Божественной комедии» Д.Алигьери. А в «Рукописи, найденной в Сарагосе» Я.Потоцкого — сплошные диспергированные прямые повторы или повторы структур, вставленных друг в друга, как матрешки. Однако в литературе повороты и повторы не должны пониматься буквально. В произведениях больших мастеров симметрия может только предполагаться, на нее может быть только намек, а не грубая демонстрация. Но здесь мы нуждаемся в явных случаях, чтобы увидеть закономерность.

Очень графически повторы использованы в хорошо известном и часто цитируемом стихотворении А.Блока:

*Ночь, улица, фонарь, аптека,  
Бессмысленный и тусклый свет,  
Живи еще хоть четверть века —  
Все будет так. Исхода нет.*

*Умрешь — начнешь опять сначала,  
И повторится все, как встарь:  
Ночь, ледяная рябь канала,  
Аптека, улица, фонарь.*

Здесь прямые повторы — содержание, а обращенные, которые их фланкируют, — создают форму. Так почему же нет исхода? Причин две. Во-первых, обращенные повторы замыкают структуру, во-вторых, между прямыми повторами ничего нет, т.е. это тандемы.

Идея использования повторов трансформируется в структуру, только из них и состоящую. Удаление уникальной части (или частей) — это дискредитация идеи, доведение ее до абсурда. В результате у Блока:

*Кольцо существования тесно;  
Как все пути приводят в Рим,  
Так нам заранее известно,  
Что всё мы рабски повторим.*

Пессимизм Блока понятен. Голые повторы — нонсенс.

Напомним, что в мире геномов прямые повторы часто разделены участками уникального текста — спейсерами. Тандемные повторы в большинстве своем коротки. Длинные тандемы, если не разделены протяженными спейсерами, нестабильны, поскольку удаляются гомологичной рекомбинацией (новое — это хорошо забытое старое). Другими словами, наличие длинных тандемных повторов невыгодно геному, ведь эволюция не создала механизма их стабилизации.

А как прямые повторы влияют на человеческие чувства? На примере стихов Блока мы увидели, что прямые повторы — это печаль и начало отчаяния. Многочисленные — уже пытка: бесконечное хождение по замкнутому кругу; всё заполняющая монотонность капель, падающих с малыми интервалами в тишине; это пульсирующая боль.

Конечно, эффект зависит от смысла повтора, от содержащейся в нем информации. Один из элементов культовых отправлений в восточных религиях — духовные ритмы. С ними можно встретиться не только в культовых церемониях, они присутствуют в танцах и ритуалах народов Африки, Кубы, Лаоса и других экваториальных стран. Духовные ритмы характеризуются постоянными повторениями ритмического мотива в комбинации с постоянным нарастанием напряжения. В результате участники впадают в неконтролируемое эмоциональное состояние, сознание уходит на второй план, у многих начинается экстаз. Повторы, имеющие определенное содержание, так сильно влияют на людей, что приводят их сознание в очень активное состояние, которое, однако, замкнуто, т.е. недоступно другим воздействиям извне. Суммируя, можно сказать, что тандемные повторы ограничивают взаимодействие духа с реальностью.

Биологическая природа также не терпит идеальных повторов. Повторы нуклеотидных последовательностей не идеальны. Идеальная симметрия чужда биологической природе не только в генетических текстах, но и в образах, узнаваемых сознанием.

Снежинки в «Волшебной горе» Т.Манна абсолютно симметричной формы. «Каждое из этих холодных созданий имело совершенные пропорции, было холодно и симметрично, и что-то болезненное было в них заключено, неорганичес-

кое, враждебное жизни: они были слишком симметричными; субстанция, предназначенная для жизни, не могла быть такой, так как жизнь дрожит при виде такой точности... принимая это за нечто смертельное, за загадку самой смерти. И Гансу Кастропу казалось, что он понял, почему античные архитекторы, строившие соборы, умышленно, хотя и тайком, нарушали симметрию...».

То, что человеческое сознание не приемлет идеальную симметрию, было известно веками, в частности, это знали мастера классической живописи. В соответствии с реальностью живого человеческие лица, детали тел на полотнах знаменитых художников не идеально симметричны. Оде Бальзак сказал, что идеальная красота сопровождается холодностью и глупостью. Ту же идею мы находим у В.Блейка, отвергавшего симметрию периодических повторов. Теперь понятно, почему стихотворения Блока, построенные на повторах, звучат так печально.

Можно вспомнить и о других областях человеческой активности, использующей повторы. Это воспитание, образование (повторение — мать учения, спорт — тренировки). Но общая идея достаточно понятна. Повторы разных типов имеют хотя и различный, но часто универсальный смысл и активно используются природой на самом базовом уровне биологической организации и человеком при создании продуктов его интеллектуальной активности на одном из самых сложных уровней биологической организации.

Возникает два вопроса: нашли ли мы общий принцип структурных характеристик генетичес-

кого материала и его очень отдаленных «продуктов»? И указывает ли участие повторов в функционировании геномов и в произведениях литературы и искусства на то, что они — неизбежное свойство всего живого? Другими словами, если такой принцип существует, подчиняются ли наши вкусы, произведения литературы и искусства законам строения геномов? Более того, если повторы — суть общего закона, то их появление в продуктах интеллектуальной деятельности человека предопределено наличием повторов в геномах.

Здесь мы обсуждали только одну особенность, присущую генетической информации, — наличие в ней различных повторяющихся последовательностей. Мы увидели некоторую универсальность принципов действия повторов на самых разных уровнях биологического мира и подошли к вопросу о причинно-следственных связях между строением геномов и особенностями человеческого восприятия мира. Существует точка зрения, что интерес человека к эволюции продиктован его стремлением побольше узнать о своем происхождении. Как видно из фрагмента стихотворения Пастернака «Свидание», это не так уж просто:

*Но кто мы и откуда,  
Когда от всех тех лет  
Остались пересуды,  
А нас на свете нет?*

Хотелось бы думать, что мы постоянно приближаемся к пониманию этого сложного и очень важного вопроса. ■

## Литература

1. Смирнов Г.Б. // Молекулярная генетика, микробиология и вирусология. 2010. №2.
2. Masumi H.S. et al. // The J. of Biol. Chem. 1989. V.264. №35. P.21031—21037.
3. Смирнов Г.Б. // ВНИИМИ, медицина и здравоохранение. Сер. «Эпидемиология, вирусология и инфекционные заболевания». Вып.3. М., 1988. С.1.
4. Смирнов Г.Б. // Успехи современной биологии. 2008. Т.128. №1. С.52—76.
5. Ильина Т.С., Романова Ю.М. // Мол. биол. 2002. Т.36. №2. С.228.
6. Шестаков С.В. // Палеонтол. журнал. 2003. №6. С.50—57.

# Непредсказуемые орбиты

И.И.Шевченко

В течение многих столетий ничто не казалось людям более далеким от хаоса и случайности, чем правильное, размеренное движение тел Солнечной системы. Целочисленные соотношения между орбитальными периодами некоторых из них, впервые обнаруженные еще в XVIII в., выглядели очевидным подтверждением царящего порядка и гармонии. Но, вразрез с очевидностью, именно такие соотношения (называемые *соизмеримостями* или *резонансами*) оказались первопричиной хаоса — явления, вовсе не связанного с какими-либо случайными воздействиями на движущиеся тела, а таящегося в самой природе движения.

Идея порядка, основанного на геометрических соотношениях, вдохновляла И.Кеплера в его первых исследованиях движения планет. В 1593 г. он заметил, что радиусы окружности, вписанной в равносторонний треугольник, и окружности, описанной вокруг него, относятся примерно как радиусы орбит Юпитера и Сатурна. Под впечатлением этого наблюдения он разработал модель Солнечной системы в виде концентрической последовательности пяти правильных многогранников. Солнечная система в этой модели подчинялась некоему статичному геометрическому порядку.

В 1784 г. П.Лаплас обратил внимание на другое, уже не геометрическое, а динамическое соотношение между орбитами



**Иван Иванович Шевченко**, доктор физико-математических наук, заведующий сектором Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, член Международного астрономического союза. Область научных интересов — динамика тел Солнечной системы, небесная механика, нелинейная динамика, динамика и физика центральных областей активных ядер галактик.

Юпитера и Сатурна — *периоды обращения* этих планет близки к целочисленной соизмеримости (резонансу)  $2/5$ . С его помощью он объяснил наблюдавшиеся аномалии в движении Юпитера и Сатурна и показал их периодический, а не монотонный (как говорят небесные механики, *вековой*) характер. Этот триумф небесной механики, наряду с другими выдающимися достижениями (в частности, с весьма точным предсказанием А.Клеродаты возвращения кометы Галлея в 1759 г.), позволил Лапласу выдвинуть идею, что мир полностью детерминирован: если в какой-то момент заданы положения и скорости составляющих его частиц, вся его последующая история предопределена. Воплощением этой идеи может служить механическое устройство — «часовой планетарий» (рис.1), представляющий движения и фазы планет и их спутников в Солнечной системе с помощью часового механизма. По словам А.Паннекука [1], «Солнечная система мыслилась как

...если вдруг планеты  
Задумают вращаться самовольно,  
Какой возникнет в небесах раздор!

В.Шекспир

гигантский механизм, приводимый в движение и подталкиваемый только силой всемирного тяготения. Это был до конца познаваемый и поддающийся вычислению часовой механизм, который навечно сохранял свое движение».

Таким образом, в конце XVIII в. учет *одионого резонанса* в теории Лапласа привел к формулировке и всеобщему научному признанию детерминизма. Полная предопределенность движения как больших, так и малых тел Солнечной системы не подвергалась сомнению. Казалось, чем точнее на-



Рис.1. «Часовой планетарий».

блюдения, чем совершеннее теория, тем на большее время можно предсказать движение любого небесного тела. Парадоксально, но спустя два века анализ *взаимодействия резонансов* в работах Б.В.Чирикова, Дж.Уиздома и других ученых разрушил детерминистическую концепцию. Отказу от нее способствовало, в частности, возвращение в 1986 г. кометы Галлея (третье после предсказанного Клеро): теперь ее орбита рассматривалась не как пример полностью рассчитываемого предопределенного движения, а как пример проявления динамического хаоса. Детерминизм Лапласа просуществовал в течение трех обращений кометы Галлея на орбите. Любопытно, что даже во времена, когда лапласовский детерминизм абсолютно господствовал в научной мысли, образованное сообщество в целом едва ли воспринимало космос как идеальный предсказуемый механизм: явления комет казались неожиданными и опасными (см. рис.2 и обсуждение в книге [2]).

### Маятник, резонансы и хаос

Резонанс представляет собой центральное понятие нелинейной динамики. Чириков в своей статье [3] определяет его так: «Под резонансом понимается такая ситуация, когда некоторые частоты невозмущенной системы близки между собой или к частотам внешнего возмущения». Как убедиться в наличии резонанса в движении тех или иных небесных тел? Ведь наблюдаемая соизмеримость между частотами никогда не бывает совершенно точной — хотя бы из-за ошибок наблюдений. Чтобы решить этот вопрос, небесные механики вводят *резонансную фазу* (часто называемую также *резонансным* или *критическим углом* или же *резонансным* или *критическим аргументом*) — линейную комбинацию (алгебраическую сум-



Рис.2. Винсент Ван Гог. «Звездная ночь» (набросок, 1889 г.).

му) угловых переменных системы с целочисленными коэффициентами, выбор которых определяет резонансное соотношение между частотами. Если этот угол изменяется в ограниченных пределах, т.е. либрирует, подобно колебаниям маятника, — система находится в резонансе, если же он неограниченно увеличивается или уменьшается, т.е. вращается, — резонанса нет. Траектория, пограничная между либрацией и вращением, носит название *сепаратрисы*. Итак, динамика жесткого маятника (он изображен на рис.3) дает модель резонанса. В определенном смысле эта модель резонанса универсальна [3, 4].

В небесной механике мы имеем дело, как правило, с *нелинейными резонансами*, когда частота фазовых колебаний на резонансе зависит от амплитуды (энергии) колебаний, как в примере маятника. В случае линейного резонанса частота от амплитуды не зависит. Подробно о свойствах нелинейного резонанса рассказано в выдающейся статье [3], где фундаментальные понятия нелинейной динамики разъясняются доступно и в то же время строго.

Малейший внешний толчок жесткого маятника, находящегося вблизи верхнего положения равновесия ( $\phi = \pm\pi = \pm 180^\circ$ ; угол  $\phi$  определен на рис.3), способен радикально изменить характер движения (например, сменить колебание на вращение). В этом состоит так называемая существенная зависимость от начальных условий. Что про-

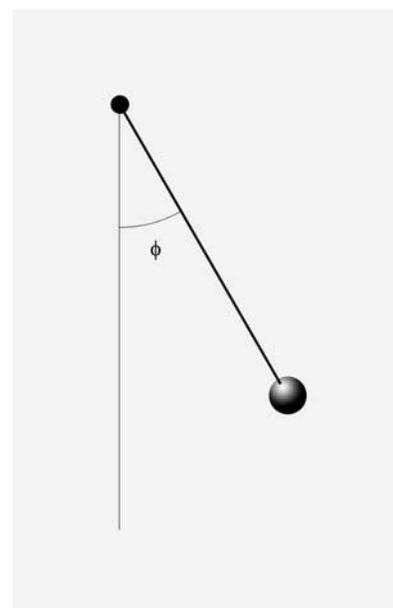


Рис.3. Маятник.

изоидет, если маятник или какую-либо другую систему с сепаратрисой подвергать периодическому возмущению? Движение системы вблизи сепаратрисы в типичном случае, т.е. для большинства начальных условий и значений параметров, станет весьма необычным. Сейчас это хорошо известно, а впервые на запутанное и сложное поведение траекторий вблизи *возмущенной* сепаратрисы (в небесно-механической задаче *трех тел*) указал А.Пуанкаре в 1899 г. Правда, тогда не предполагалось, что характер этого запутанного движения в каком-либо смысле «случаен».

Долгое время исследования движения вблизи сепаратрисы совсем не касались хаотического поведения, а ограничивались анализом частных случаев, когда был возможен традиционный подход. В 1908 г. английский ученый А.Стефенсон опубликовал работу о динамике обращенного ( $\phi = \pm\pi = \pm 180^\circ$ ) жесткого маятника с вибрирующей точкой подвеса. Он нашел, что вертикальная вибрация подвеса со специально подобранными частотой и амплитудой способна стабилизировать обращенный маятник. Этот эффект наглядно

продемонстрировали эксперименты П.Л.Капицы в конце 40-х годов прошлого века. Современные возможности вычислительной техники дают возможность взглянуть на этот эффект по-новому: если построить *сечение фазового пространства* (пространства координат и импульсов динамической системы) для такого маятника, то выясняется, что область устойчивости представляет собой лишь небольшой островок в обширном хаотическом «море», образуемом траекториями с очевидно нерегулярным поведением. До середины прошлого века это хаотическое движение не было объектом научного исследования, как и хаотическое движение любой другой динамической системы.

В 1959 г. Чириков впервые описал динамический хаос как порождение *взаимодействия резонансов*, а в качестве критерия возникновения хаоса предложил *критерий перекрытия резонансов* [3, 5]. Ограничимся здесь поясняющим примером. Фазовое пространство в случае невозмущенного маятника имеет два измерения, определяемые двумя переменными — углом отклонения  $\phi$  и импульсом  $p = ml\dot{\phi}$ , где  $m$  — масса маятника,  $l$  — его

длина,  $\dot{\phi}$  — скорость изменения угла  $\phi$ . На хорошо известном *фазовом портрете*  $\phi-p$  невозмущенного жесткого маятника (рис.4) имеется единственная область либраций (колебаний), ограниченная невозмущенной сепаратрисой. Иначе говоря, маятниковая модель резонанса в невозмущенном случае описывает единственный резонанс. Если включить периодическое возмущение — вибрацию подвеса — то фазовое пространство нашей динамической системы уже не будет двумерным и для сравнения с фазовым портретом в невозмущенном случае будет необходимо построить *сечение фазового пространства*. Оно строится следующим образом: станем откладывать значения переменных на графике не непрерывно, а «стробоскопически» — через постоянные интервалы времени, равные периоду возмущения. На построенном таким образом сечении мы увидим уже не одну, а три области либраций — три резонанса (рис.5). Если частота возмущения относительно велика, разделение резонансов по импульсу велико и они почти не «взаимодействуют». При уменьшении частоты возмущения резонансы сближаются и в окрестности сепаратрис возникают заметные хаотические слои, где, как хорошо видно на рис.5, движение очевидным образом нерегулярно; при дальнейшем уменьшении частоты возмущения эти слои сливаются в единый хаотический слой — результат взаимодействия резонансов при их сильном сближении в фазовом пространстве.

По словам Чирикова, «...физик прежде всего старается выяснить, какие резонансы играют роль в той или иной системе и как они взаимодействуют друг с другом» [3]. Именно наличие резонансов, — казалось бы, воплощения порядка, — приводит к непредсказуемому, хаотическому характеру движения. Иными словами, присутствие резонансов в фазовом пространстве

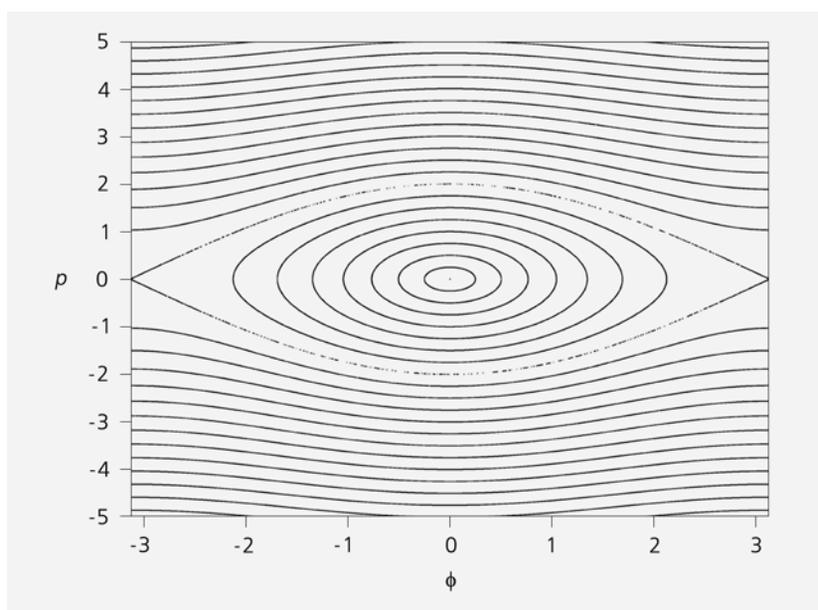


Рис.4. Фазовый портрет для невозмущенного маятника.

обуславливает и присутствие хаотической компоненты в этом пространстве. Правда, как мы только что видели, чтобы хаос мог существовать, требуется наличие в фазовом пространстве не одного, а двух или более резонансов, — необходимо их взаимодействие.

Движение в окрестности возмущенных сепаратрис резонансов является хаотическим. При относительно малых возмущениях системы для описания хаотической компоненты удобно применять понятие *хаотического слоя*. Он представляет собой область — окрестность сепаратрис — в фазовом пространстве, внутри которой динамическая система движется хаотическим образом. Теория хаотического слоя имеет приложения в самых разных областях механики и физики [4, 6]. Ключевую роль в ней играют *сепаратрисные отображения*. Они представляют движение системы вблизи сепаратрисы в дискретном виде («стробоскопически», как и выше — при построении сечения фазового пространства): состояние системы, задаваемое переменными «время» и «энергия», фиксируется не непрерывно, а лишь в моменты прохождения маятником, описывающим резонанс, его положений равновесия. Пример сепаратрисного отображения:

$$\begin{aligned} y' &= y + \sin x, \\ x' &= x + \lambda \ln|y'| + c, \end{aligned}$$

где  $x$ ,  $y$  и  $x'$ ,  $y'$  — переменные «время» и «энергия» (в нормализованном безразмерном виде) в два следующих друг за другом момента времени, когда эти переменные фиксируются;  $\lambda$ ,  $c$  — постоянные, выражаемые через физические параметры исходной системы.

Моделью нелинейного резонанса при выводе уравнений сепаратрисного отображения в классической форме (см. [4]) служит рассмотренный нами выше *возмущенный маятник* — динамическая система, описывающая маятник с периодическими возмущениями. Важней-

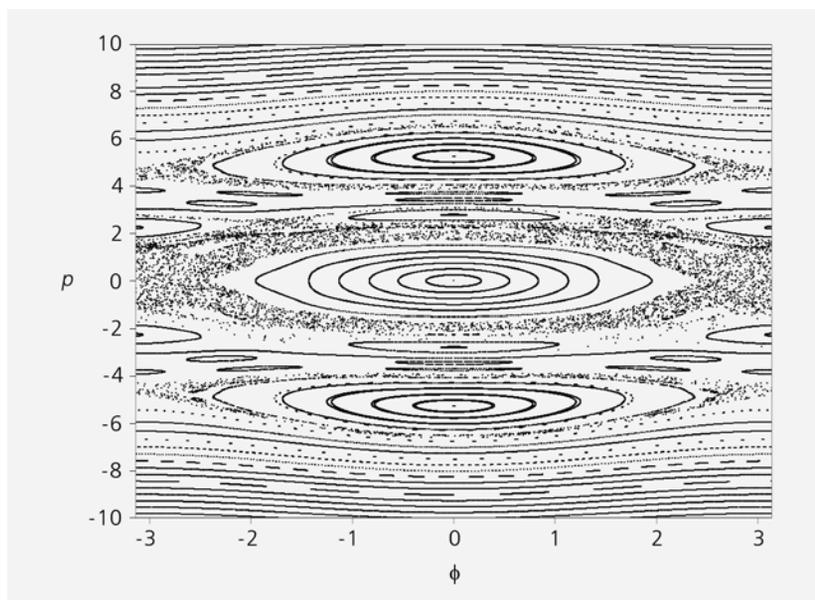


Рис.5. Триплет взаимодействующих резонансов при умеренной относительной частоте возмущения.

ший параметр сепаратрисного отображения — так называемый *параметр адиабатичности*  $\lambda$ , равный отношению частоты возмущения к частоте малых фазовых колебаний на резонансе. Сепаратрисное отображение применимо для описания движения при любых значениях этого параметра [7]. Пример хаотического слоя, описываемого сепаратрисным отображением, показан на рис.6. Сепаратрисное отображение в случае асимметричного возмущения представляет собой более сложный алгоритм: оно содержит условные переходы [8].

Если близкие траектории в ограниченном фазовом прост-

ранстве расходятся по экспоненте — иначе говоря, если расстояние между двумя исходно близкими точками этих траекторий растет со временем экспоненциально, — то движение хаотично. Скорость расхождения близких траекторий (в фазовом пространстве и в логарифмическом масштабе расстояний) характеризуется так называемым *максимальным показателем Ляпунова*. О том, что движение хаотично, говорит отличие максимального показателя Ляпунова от нуля. Величина, обратная этому показателю,  $T_L \equiv L^{-1}$ , — так называемое *ляпуновское время*, представляет собой характерное время предсказуемой дина-

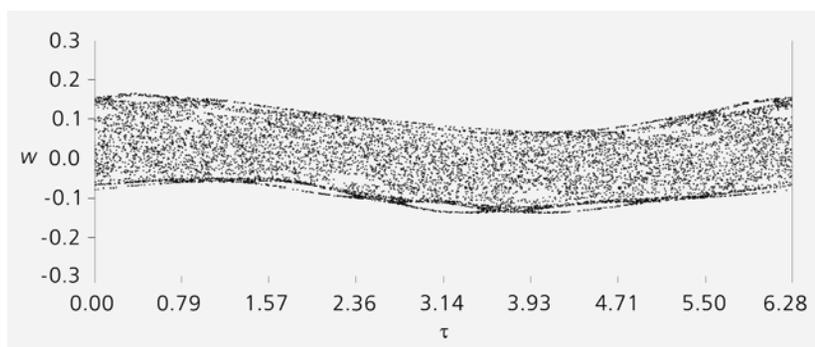


Рис.6. Хаотический слой в координатах «время — энергия», пример.

мики. О важности данной величины для небесной механики говорит то обстоятельство, что ни одна точная теория движения любой небесно-механической системы не может быть построена на временах, много больших ее ляпуновского времени.

Искусство вычисления показателей Ляпунова на ЭВМ имеет более чем тридцатилетнюю историю и за это время стало обширным разделом прикладной математики. Современные численные методы позволяют вычислять их эффективно и точно. С другой стороны, методы аналитического оценивания показателей Ляпунова появились лишь в последние несколько лет.

Метод оценивания максимального показателя Ляпунова [9, 10], основанный на теории сепаратрисных отображений, позволил получить в ряде задач динамики тел Солнечной системы аналитические оценки ляпуновских показателей (см. обзор [6]), которые весьма хорошо согласуются с численно-экспериментальными.

### Хаос во вращении спутников планет

В 1984 г. Дж.Уиздом, С.Пил (США) и Ф.Миньяр (Франция) на основе численных экспериментов и теоретических оценок ширины хаотического слоя предсказали, что седьмой спутник Сатурна, Гиперион (рис.7), находится в хаотическом вращении относительно собственного центра масс: ориентация спутника и скорость его вращения изменяются со временем хаотически. Причина хаоса во вращательной динамике спутников кроется во взаимодействии *спин-орбитальных резонансов* (резонансов между вращением и орбитальным движением). Оказалось, что у Гипериона оно особенно сильно — в конечном счете из-за сильной несферичности его фигуры и существенного отличия орбиты от круговой, т.е. заметного эксцен-

*триситета* орбиты. (Эксцентриситет орбиты характеризует ее вытянутость; определение этого и других *элементов орбиты* см., например, в [11].)

Источником данных о вращательной динамике малых спутников планет служит, как правило, анализ их оптических кривых блеска — рядов значений светового потока, фиксируемых наблюдателем на протяжении того или иного интервала времени. В 1989 г. американский астроном Дж.Клаветтер, проведя анализ и моделирование построенной им кривой блеска Гипериона, заключил, что этот спутник, по всей вероятности, действительно вращается нерегулярным образом. В 2002 г. в Пулковской обсерватории А.В.Мельников с помощью специально разработанного комплекса программ промоделировал кривые блеска Гипериона как по данным наблюдений Клаветтера, так и по данным пулковских наблюдений А.В.Девяткина и др. и путем вычисления ляпуновских показателей движения сделал строгий вывод, что Гиперион находится в хаотическом режиме вращения. На рис.8 приведены модельные кривые блеска Гипериона.

Плоские (в плоскости орбиты) колебания и вращения спутника вблизи *синхронного* резонанса (резонанса, при котором период вращения спутника равен его орбитальному периоду, как у Луны) описываются уравнением возмущенного маятника, где роль угла отклонения маятника выполняет угол, задающий ориентацию спутника относительно направления на планету. Поэтому оказывается применимым метод аналитического оценивания максимального показателя Ляпунова [9, 10], основанный на теории сепаратрисных отображений. Теоретические оценки ляпуновского времени ( $\approx 30$  сут) хорошо согласуются с численно-экспериментальными [12, 13].

Есть ли в Солнечной системе другие (помимо Гипериона)

спутники, хаотически кувыркающиеся относительно собственного центра масс? У многих спутников характер вращения неизвестен. Спутники, для которых он установлен, в большинстве своем вращаются синхронно с орбитальным движением: подобно Луне, они постоянно обращены к планете одной стороной. Однако в течение долговременной динамической эволюции любой спутник в какой-то момент времени обязательно оказывается в состоянии хаотического вращения — например, при прохождении через сепаратрису синхронного резонанса, — иначе он не может быть захвачен в синхронное вращение. У малых и крупных спутников характер хаотического вращения различен. У малых (спутников неправильной формы) такое вращение представляет собой трехмерное кувыркание; у большинства крупных (спутников, близких к сферическим) вращательное движение в хаотическом слое в окрестности сепаратрисы сохраняет плоский характер: ось вращения остается приблизительно ортогональной плоскости орбиты [13].

Наши теоретические исследования показали [13], что в состоянии хаотического враще-

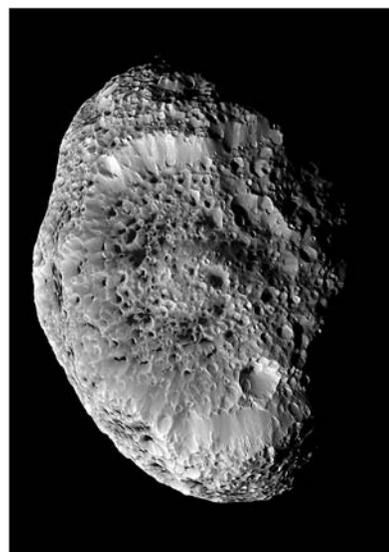


Рис.7. Гиперион. Снимок с космического аппарата «Cassini».

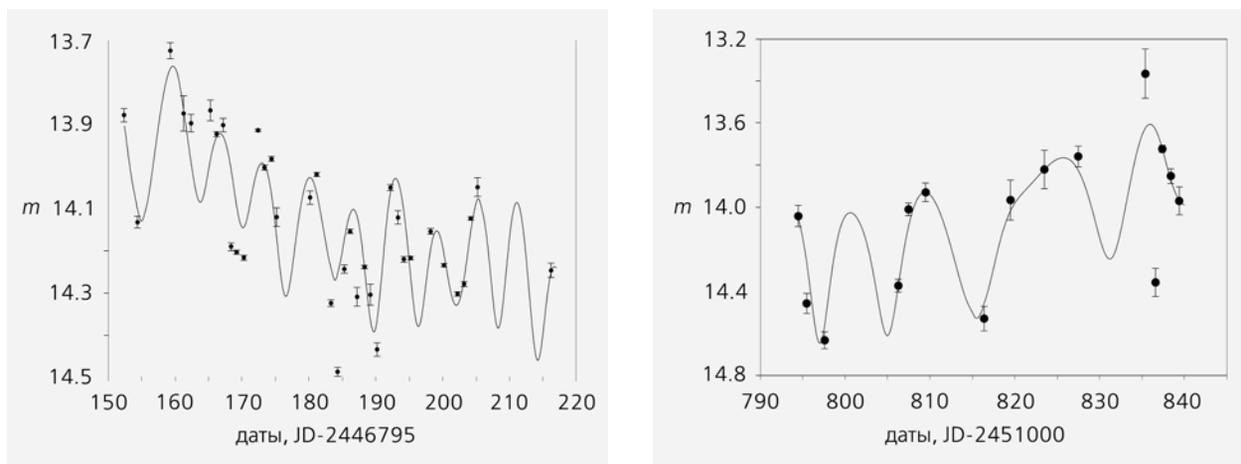


Рис.8. Модельные кривые блеска Гипериона: для наблюдательных данных Клаветтера (слева); для наблюдений, выполненных в Пулковке в 2000 г. (справа). Кружки — наблюдательные данные. По осям: JD — юлианская дата,  $m$  — звездная величина. Звездная величина характеризует наблюдаемый блеск объекта в логарифмическом масштабе, юлианская дата задает время в сутках (строгие определения  $m$  и JD см. в [11]).

ния, возможно, находятся кроме Гипериона также 16-й и 17-й спутники Сатурна Прометей и Пандора, причем ляпуновское время вращения у каждого очень мало: 0.5–0.6 сут. Характер их вращения в настоящее время неизвестен. Очень важен вопрос: существует ли преимущественная ориентация спутника при «хаотическом кувыркании» или все его ориентации в этом случае равновероятны? Расчеты свидетельствуют [14], что у Прометея и Пандоры в случае их хаотического вращения присутствует преимущественная ориентация наибольшей оси фигуры спутника в направлении на Сатурн. Это затрудняет извлечение выводов о характере вращения этих спутников из наблюдений, поскольку хаотический режим в определенной степени схож с обычным синхронным вращением.

Согласно численно-экспериментальным и аналитическим оценкам [12, 13], ляпуновские времена хаотического вращения малых спутников планет Солнечной системы могут быть весьма невелики — до полусуток, т.е. хаос в случае его наличия вполне наблюдаем. Однако хаотическое вращение до сих пор наблюдалось только в слу-

чае Гипериона. Из более чем 160 открытых к настоящему времени спутников состояние вращения из наблюдений определено у 33. При этом 25 спутников находятся в синхронном резонансе, а у семи периоды вращения много меньше орбитальных периодов.

А что же Луна, являющаяся, по образному выражению В.Пелевина, «из всех планет и небесных тел важнейшим для нас»? Как хорошо известно каждому, Луна всегда обращена к нам одной и той же стороной, т.е. находится в синхронном резонансе. Не так широко известно, что она испытывает малые колебания относительно этого положения. Это явление носит название *физической либрации* Луны. Насколько регулярны и предсказуемы малые колебания нашего спутника, если рассматривать большие интервалы времени? К сожалению, этот вопрос до сих пор никем не рассматривался — по-видимому, в силу сложности задачи.

### Спутниковые системы

Если орбитальные частоты (как говорят небесные механики, *средние движения*) планет

в планетной системе или спутников в спутниковой системе примерно соизмеримы, т.е. их отношение приблизительно равно отношению двух целых чисел, то система либо близка к орбитальному резонансу, либо находится в нем. В Солнечной системе многие спутники планет входят в резонансные или близкие к резонансным системы. Например, в системе Юпитера Ио и Европа, а также Европа и Ганимед находятся в *резонансе средних движений* 2/1. В системе Сатурна Мимас и Тетия, а также Энцелад и Диона пребывают в резонансе 2/1, Диона и Рея — вблизи резонанса\* 5/3, Титан и Гиперион — в резонансе 4/3. В системе Урана все резонансы приблизительные: Миранда и Умбриэль движутся вблизи резонанса 3/1, Ариэль и Умбриэль — 5/3, Умбриэль и Титания — 2/1, Титания и Оберон — 3/2.

Захваты спутниковых систем в орбитальные резонансы — закономерные этапы приливной эволюции этих небесно-механических систем. Американские

\* Выражение «вблизи резонанса» означает, что орбитальные периоды лишь приблизительно удовлетворяют данному целочисленному соотношению и при этом соответствующая резонансная фаза вращается, а не колеблется.

ученые У.Титтемор, Дж.Уиздом, К.Мюррей с соавторами еще в 80-х годах прошлого века показали, что такой захват может существенным образом повлиять на дальнейшую орбитальную динамику спутников и даже на их внутреннее строение. При захвате в орбитальный резонанс или при выходе из него система пересекает границы хаотического слоя в окрестности сепаратрис резонанса. Внутри слоя система движется хаотическим образом. Однако причиной хаоса является, как правило, взаимодействие не отдельных резонансов средних движений, а *субрезонансов в мультиплетах*, соответствующих одному такому резонансу. Форма и ориентация орбит испытывают медленные вариации, включающие монотонную (*вековую*) прецессию орбит. Расщепление орбитальных резонансов на субрезонансы вызвано этой прецессией.

Второй (Миранда) и пятый (Умбриэль) спутники Урана в настоящее время не находятся между собой в точном орбитальном резонансе, но довольно близки к резонансу 3/1. Согласно выводам Титтемора и Уиздома, весьма вероятно, что в прошлом эти спутники находились некоторое время в резонансе 3/1 в ходе приливной эволюции их орбит. Пример сечения фазово-

го пространства движения для одной из стадий эволюции системы приведен на рис.9. Численно-экспериментальные и аналитические (полученные с помощью теории сепаратрисных отображений) оценки ляпуновского времени сделаны А.В.Мельниковым и мной. Ляпуновское время хаотической системы на разных этапах эволюции оказалось равным 50—100 лет.

Хаотические режимы в динамике спутниковых систем имели место не только в прошлые эпохи истории Солнечной системы. В конце 90-х годов французские ученые С.Шампенуа и А.Виенн рассмотрели динамику находящихся в орбитальном резонансе 2/1 первого и третьего спутников Сатурна, Мимаса и Тефии. Эта динамика, по-видимому, хаотична благодаря большой амплитуде либраций на резонансе. Шампенуа и Виенн привели усредненное уравнение задачи к уравнению нелинейного маятника с периодическими возмущениями. Используя это аналитическое представление, можно получить аналитические оценки ляпуновского времени. Такие оценки получили мы с Мельниковым, причем не только аналитически, но и численно, посредством прямого интегрирования уравнений движения. Эти оценки составляют 300—600 лет в

разных моделях. Таким образом, в этой системе хаос на временных масштабах, доступных для наблюдений, не проявляется.

Поведение системы Прометей—Пандора (16-й и 17-й спутники Сатурна — спутники-пастухи кольца F) гораздо более хаотично. П.Голдрайх и Н.Рапппорт (США) в 2003 г. численно-экспериментальным путем оценили ляпуновское время орбитального движения в окрестности резонанса 121/118 средних движений в этой системе. По их данным, оно составляет  $\approx 3.3$  года. А.Фармер и П.Голдрайх в статье 2006 г. привели уравнение движения к маятниковому с периодическими возмущениями. С помощью этого представления и метода, основанного на теории сепаратрисных отображений, можно получить аналитическую оценку  $T_L$  [10]. Она практически совпадает с численно-экспериментальными оценками.

Итак, имеющиеся оценки ляпуновского времени для систем Прометей—Пандора ( $\approx 3$  года), Миранда—Умбриэль (50 — 100 лет) и Мимас—Тефия (300 — 600 лет) свидетельствуют, что диапазон значений времени предсказуемой динамики в спутниковых системах, находящихся в хаотических режимах движения, весьма широк: по порядку величины в известных случаях

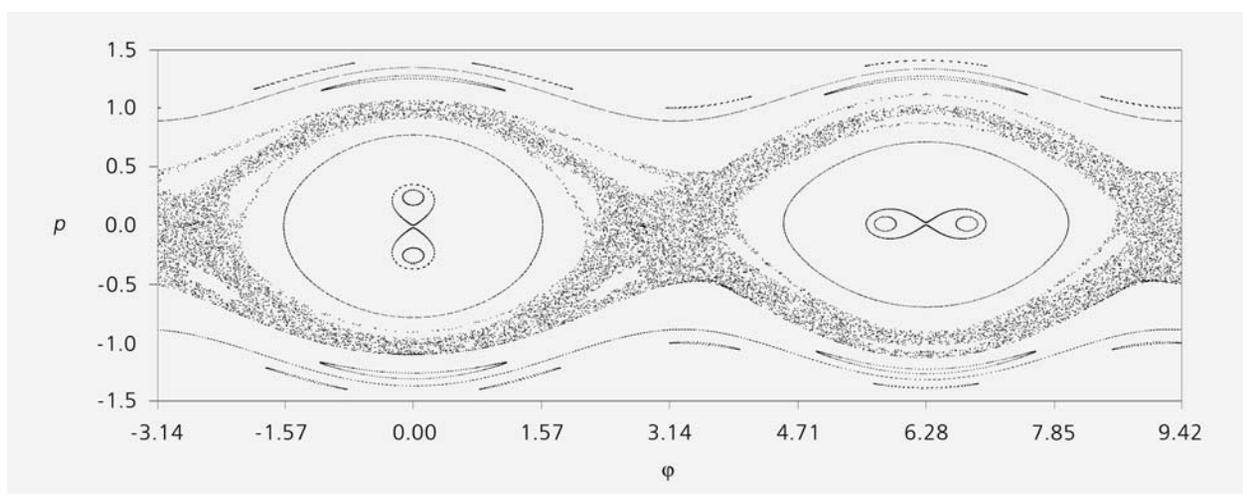


Рис.9. Сечение фазового пространства для системы Миранда—Умбриэль. Видны широкие хаотические слои в окрестности сепаратрис.

он составляет от года до тысячи лет. В случае системы Прометей—Пандора орбитальный хаос ввиду малого ляпуновского времени потенциально наблюдаем.

### Орбитальная динамика астероидов и комет

Важная роль резонансов в динамике астероидов стала ясна со времени открытия в 1867 г. Д.Кирквудом люков («малонаселенных» областей) в поясе астероидов. Наиболее выраженные минимумы в распределении астероидов по большому полуосям орбит соответствуют резонансам средних движений  $2/1$ ,  $3/1$ ,  $4/1$ ,  $5/2$  и  $7/3$  с Юпитером [11]. Роль хаоса в «очистке» люков от астероидов была выяснена Уиздомом в начале 80-х годов прошлого века — по крайней мере для люка  $3/1$  (этот люк и люк  $2/1$  — самые выраженные): хаотическим орбитам вблизи этой соизмеримости свойственны спорадические скачки эксцентриситета, которые приводят к пересечению орбиты астероида с орбитой Марса, и астероид рано или поздно выбрасывается из области люка вследствие тесного сближения с этой планетой.

Область хаоса, соответствующая резонансу  $3/1$ , показана на рис.10 на представительном множестве начальных значений большой полуоси  $a$  и эксцентриситета  $e$  орбиты астероида. Границы этой области определены путем вычисления значений максимального показателя Ляпунова для системы Солнце—Юпитер—астероид. Начальные данные, отвечающие хаотическим траекториям со скачками эксцентриситета, выделены черным, а хаотическим траекториям без скачков — серым. Рисунок наглядно демонстрирует значительную протяженность околорезонансной области хаоса.

Орбитальные резонансы в движении астероидов разделяют на *резонансы средних движений* и *вековые*. Первые представляют собой соизмеримости между

средними частотами орбитального обращения астероида и планеты, вторые — соизмеримости между скоростями прецессий орбит. Помимо обычных резонансов средних движений астероида и планеты существуют важную роль в динамике астероидов играют *трехтельные резонансы* средних движений. В этом случае резонансная фаза представляет собой комбинацию угловых координат астероида и двух планет (например, астероида, Юпитера и Сатурна). Как для обычных, так и для трехтельных резонансов уравнение движения в типичных случаях приближенно приводится к маятниковому с периодическими возмущениями, поэтому можно аналитически оценить ляпуновские времена движения [15].

Согласно помещенным на сайте А.Милани и др.\*\* данным об орбитах более 100 тыс. астероидов, среди численно-экспериментальных оценок ляпуновского времени астероидов глав-

ного пояса не встречаются значения менее 400 лет. Обычно неизвестно, принадлежность к какому резонансному мультиплету служит причиной хаотического поведения астероида, так как отождествить трехтельные резонансы довольно трудно. Аналитическое оценивание показателей Ляпунова представляет собой перспективный инструмент для отождествления резонансов: путем сравнения аналитического и численно-экспериментального значения можно делать выводы о правдоподобии отождествления резонанса.

Астероиды и кометы, сближающиеся с планетами, безусловно, — в числе самых хаотичных объектов Солнечной системы. Совсем недавно Дж.Вальсекки [16] убедительно показал, что история исследований хаотической динамики малых тел Солнечной системы ведет отсчет от работ о динамике кометы Лексея, выполненных учеником Л.Эйлера А.И.Лекселем в 70-х годах XVIII в. и У.Леверье в 40—50-х годах XIX в. Работы

\*\* <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdys/>

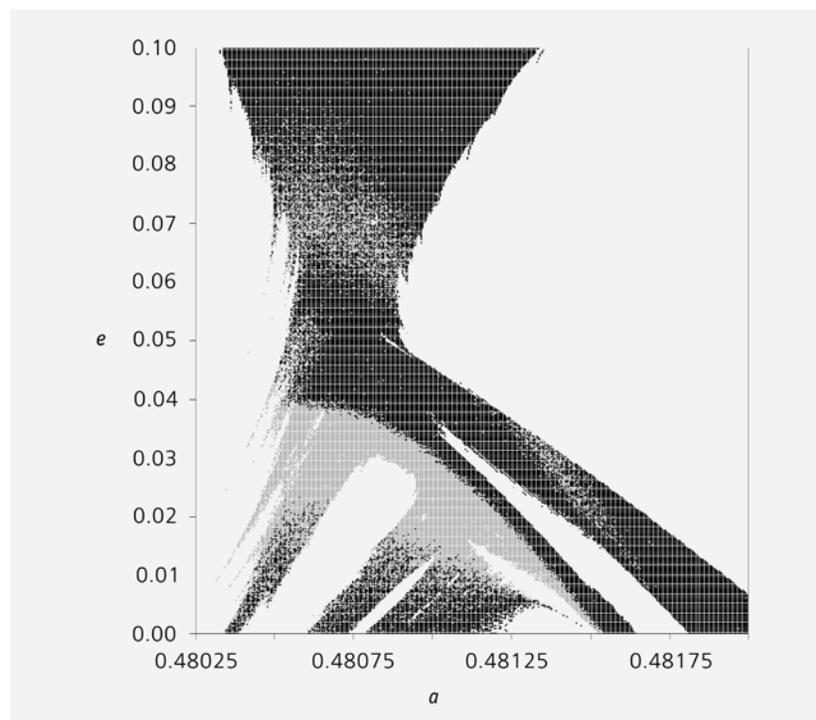


Рис.10. Область резонанса  $3/1$  с Юпитером в движении астероидов;  $a$  — большая полуось,  $e$  — эксцентриситет орбиты астероида.

Лекселя были опубликованы в трудах *Academia Petropolitana* — Российской академии наук. По утверждению Вальсекки, «с трудов Лекселя начинается современное понимание динамики малых тел Солнечной системы» [16]. Это современное понимание заключается в учете первостепенной роли резонансов и сближений с планетами. В небесно-механических расчетах Леверье впервые появилось понятие *существенной зависимости от начальных условий*: весьма малые модельные вариации скорости (порядка нескольких метров в секунду) кометы Лекселя в перигелии приводили к *качественным* изменениям ее орбиты.

Комета Лекселя, прошедшая в 1770 г. на беспрецедентно близком расстоянии от Земли, была, по-видимому, выброшена за пределы Солнечной системы в результате последовавшего через девять лет сближения ее с Юпитером. В истории астрономических наблюдений она стала первым выдающимся примером объекта, сближающегося с Землей. Уже по нему видно, что проблема оценки степени предсказуемости движения тел, сближающихся с планетами, имеет не только теоретическое, но и важное практическое значение. Такая оценка для относительно орбитального движения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и других потенциально опасных для Земли объектов представляется одним из самых сложных аспектов проблемы астероидной опасности. Одни астероиды движутся по вполне предсказуемым орбитам, другие — нет. По словам А.Уиппла, «существование значительной популяции экстремально хаотичных АСЗ должно приниматься в расчет при оценке потенциальной опасности, которую представляют собой эти объекты. Пусть, например, ляпуновское время  $T_L = 20$  лет. Если начальная ошибка в определении положения астероида 100 км (весьма оптимистичес-

кая оценка), эта ошибка вырастет до одного земного радиуса за 83 года, и до расстояния Земля—Луна — за 165 лет. Оценки опасности со стороны подобных объектов могут быть сделаны только для коротких интервалов времени» [17].

Ляпуновские показатели для объектов подобного рода могут быть оценены путем анализа *отображения Кеплера*. Уравнения этого отображения были выведены Б.В.Чириковым и В.В.Вечеславовым, а также независимо Т.Петроски (США) в 1986 г. в связи с явлением кометы Галлея. Модель движения состоит в предположении, что главный возмущающий эффект со стороны Юпитера сосредоточен на относительно коротком интервале времени, когда комета находится вблизи перигелия своей орбиты. Этот эффект определяется фазой сближения с Юпитером. Вывод формулы движения комет и АСЗ основан на представлении об отображении Кеплера как обобщенном сепаратрисном отображении, при этом невозмущенная параболическая орбита играет роль невозмущенной сепаратрисы [15]. Эта формула дает нижнюю границу возможных значений  $T_L$ . На настоящий момент, насколько известно, ни один из наблюдаемых объектов не нарушает этой границы.

В целом астероиды, сближающиеся с планетами (АСЗ в их числе), и кометы входят в число наиболее хаотичных объектов Солнечной системы. Ляпуновские времена этих объектов по сравнению с ляпуновскими временами большинства обычных астероидов могут быть очень малы и составлять порядка нескольких лет.

В начале 90-х годов прошлого века Б.Шовино, П.Фаринелла, Ф.Миньяр (Франция) и Д.Шиэрс (США) обнаружили, что динамика малого спутника вращающегося астероида неправильной формы может быть в высокой степени хаотичной. В 1997 г. Ж.-М.Пти с соавторами сделали, по-видимому, единственную к

настоящему времени оценку ляпуновского времени возможной хаотической динамики кратного астероида: в численном эксперименте они установили, что орбитальное движение Дактиля — спутника астероида 243 Иды — может быть хаотичным с ляпуновским временем от 9 сут до 4 лет. В высокохаотичных режимах движения спутник довольно быстро падает на поверхность Иды либо улетает.

К числу двойных относится и астероид 762 Пулкова. Хотя кратных астероидов известно уже более 160 и открывают все новые и новые, по-видимому, не следует ожидать, что хаос в таких системах можно будет наблюдать часто. Системы, для которых тип динамики уже известен, как правило, регулярны и, более того, обладают двойной синхронизацией: периоды вращения обоих компонентов вокруг их центров масс равны орбитальному периоду, при этом оба компонента всегда обращены друг к другу одной и той же стороной, т.е. мы имеем дело с системами, достигшими финальной стадии приливной эволюции.

## Вкратце о больших планетах

И на самом высоком уровне структурной иерархии Солнечной системы есть резонансы и хаос. Широко известны приливные орбитальные соизмеримости Юпитер—Сатурн (отношение средних движений  $\approx 5/2$ ), Сатурн—Уран ( $\approx 3/1$ ), Уран—Нептун ( $\approx 2/1$ ), резонанс Нептун—Плутон ( $3/2$ ). В конце 80-х годов в численных экспериментах Дж.Зюссмана и Дж.Уиздома (США) и независимо Ж.Ласкара (Франция) были получены первые оценки ляпуновского времени Солнечной системы. Оказалось, что оно отнюдь не бесконечно, т.е. движение Солнечной системы не является регулярным. К тому же оно относительно невелико: на три по-

рядка меньше возраста Солнечной системы. Согласно расчетам Зюссмана и Уиздома, ляпуновское время внешней Солнечной системы (от Юпитера до Плутона) составляет  $\approx 10$  млн лет. А для системы из всех планет, как с Плутоном, так и без него,  $T_L \approx 5$  млн лет.

На первый взгляд кажется, что основной вклад в хаос должны вносить планеты относительно малых масс — планеты земной группы и еще недавно причислявшийся к планетам Плутон. Однако если в расчетах ограничиться только четырьмя планетами-гигантами, то, как в 1992 г. установили Зюссман и Уиздом, а в 1999 г. подтвердили Н.Мюррей и М.Хольман (США), хаос остается и, более того, ляпуновское время практически не изменяется:  $T_L \approx 5-7$  млн лет.

Мюррей и Хольман нашли, что источником хаоса может быть мультиплет субрезонансов, связанный с выявленным ими трехтельным резонансом Юпитер—Сатурн—Уран. Этот вывод, однако, носит предварительный характер, поскольку полного согласия аналитической модели с численным экспериментом пока нет. Если модель верна, степень хаотичности Солнечной системы носит в известном

смысле произвольный характер: если бы большая полуось орбиты Урана отличалась от настоящего значения всего на величину порядка нескольких диаметров Урана, хаотичность бы резко уменьшилась, а то и вовсе практически исчезла. В будущих исследованиях, когда будет уточнено отождествление ведущего трехтельного резонанса, для аналитической оценки  $T_L$  станет возможным использовать методы, основанные на теории сепаратрисных отображений.

\* \* \*

Идея полной предопределенности движения как больших, так и малых тел Солнечной системы была основополагающей в небесной механике вплоть до 80-х годов прошлого века, но сейчас мы знаем, что время предсказуемого движения любого тела в Солнечной системе ограничено по порядку величины значением его ляпуновского времени. Для одних тел это время велико и движение практически регулярно; для других, напротив, динамический хаос проявляется на малых временах, так что его можно непосредственно наблюдать.

Прямые астрономические наблюдения хаоса в случае его

присутствия возможны при изучении вращательной динамики малых спутников планет, где ляпуновские времена достаточно малы и хаотический характер динамики проявляется на доступных для наблюдений интервалах времени. Присутствие хаоса также можно обнаружить в динамике комет, если, как в случае кометы Галлея, имеются исторические хроники о датах возвращений. Высокохаотичным, как правило, оказывается движение астероидов и комет, сближающихся с планетами. Судя по ляпуновским временам, хаос (если он есть) также может быть наблюдаемым в движении спутниковых систем и во внутренней орбитальной динамике кратных астероидов.

Хотя в динамике многих других тел Солнечной системы хаос незаметен — либо из-за слишком больших ляпуновских времен, либо по причине удаленности от нас эпохи, когда движение было сильно хаотичным, — важно помнить, что в долговременной эволюции его роль велика и он накладывает отпечаток на современный облик и структуру Солнечной системы, например в виде люков Кирквуда в главном поясе астероидов. ■

## Литература

1. *Pannekoek A.A.* History of Astronomy. L., 1961.
2. *Voite A.* Van Gogh: La Nuit étoilée. L'Histoire de la Matière et la Matière de L'Histoire. Paris, 1990.
3. *Чириков Б.В.* Нелинейные резонансы и динамическая стохастичность // Природа. 1982. №7. С.15—25.
4. *Chirikov B.V.* // Phys. Rep. 1979. V.52. P.263—379.
5. *Чириков Б.В.* // Атомная энергия. 1959. Т.6. С.630—638.
6. *Шевченко И.И.* Резонансы и хаос в динамике тел Солнечной системы // Орлов В.В. и др. Астрономия: традиции, настоящее, будущее: Сборник обзоров. СПб., 2007. С.284—314.
7. *Шевченко И.И.* // ЖЭТФ. 2000. Т.118. С.707—719.
8. *Shevchenko I.I.* // Celest. Mech. Dyn. Astron. 1999. V.73. P.259—268.
9. *Шевченко И.И.* // Космич. исслед. 2002. Т.40. С.317—326.
10. *Shevchenko I.I.* // MNRAS. 2008. V.384. P.1211—1220.
11. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы. М., 2009, 2010.
12. *Shevchenko I.I., Koupryanov V.V.* // Astron. Astrophys. 2002. V.394. P.663—674.
13. *Koupryanov V.V., Shevchenko I.I.* // Icarus. 2005. V.176. P.224—234.
14. *Melnikov A.V., Shevchenko I.I.* // Celest. Mech. Dyn. Astron. 2008. V.101. P.31—47.
15. *Shevchenko I.I.* // Near Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk. IAU Symp. 236 / Eds A.Milani et al. Cambridge, 2007. P.15—29.
16. *Valsecchi G.B.* // Near Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk. IAU Symp. 236 / Eds A.Milani et al. Cambridge, 2007. P.XVII—XX.
17. *Whipple A.L.* // Icarus. 1995. V.115. P.347—353.

# Искусственный фотосинтез — путь к «чистой» энергии

В.В.Еремин

## «Чистая» энергия

Главное, что нужно для жизни, это энергия. Только энергия, получаемая из окружающей среды, позволяет живым системам противостоять росту энтропии и стремлению Природы привести все в состояние равновесия, которое предсказывает второй закон термодинамики.

Основной внешний источник энергии Земли — солнечное излучение. Каждый год Земля получает от Солнца  $6 \cdot 10^{24}$  Дж, т.е. около 1000 Дж в секунду на  $1 \text{ м}^2$  поверхности. Чуть больше половины этой энергии поглощается, остальная отражается атмосферой и поверхностью.

Потребности человечества в энергии растут в геометрической прогрессии: в течение 20-го столетия население Земли увеличилось в 4 раза, а энергетические затраты — в 16 раз. В настоящее время для поддержания жизнедеятельности 6.5 млрд человек, населяющих Землю, за год производится около  $5 \cdot 10^{20}$  Дж энергии (данные 2006 г.), что соответствует общей мощности 16 ТВт ( $16 \cdot 10^{12}$  Вт). Современная энергетика базируется на топливе, причем более чем на 90% — на окислении каменного угля, нефти и газа, а также продуктов их переработки. Продукты окисления выбрасываются в окружающую среду и оказывают влияние на климат. Поэтому особое



*Вадим Владимирович Еремин, доктор физико-математических наук, профессор химического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Лауреат премии Президента РФ в области образования. Научные интересы связаны с фемтохимией, квантовой динамикой молекул, теорией внутримолекулярных процессов.*

значение приобретают «чистые» источники энергии, не изменяющие состав земной атмосферы. Согласно Конвенции ООН об изменении климата, «для стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на уровне, предотвращающем антропогенное воздействие на климат Земли, к 2050 г. необходимо производить 10 ТВт экологически чистой энергии, без выделения  $\text{CO}_2$ ». Это сравнимо с общей мощностью всех действующих источников энергии.

Существует три основных подхода к производству «чистой» энергии:

- нейтрализация  $\text{CO}_2$ , полученного из обычных источников энергии;
- ядерная энергетика;
- использование возобновляемых источников энергии [1].

Производство 10 ТВт из углеводородного топлива потребует ежегодной консервации 25 млрд т ( $12.5 \text{ тыс. км}^3$ ) углекислого газа. Если ограничиться только ядерной энергией, то для достижения требуемой мощности необходимо будет в течение ближайших 30 лет ежедневно вводить в строй по одной АЭС мощностью 1 ГВт. Останутся возобновляемые источники энергии, потенциал которых известен (табл.).

Очевидно, что наиболее перспективный и практически неисчерпаемый источник энергии — солнечное излучение, которое пока обеспечивает всего 0.01% от энергетических потребностей человечества [1]. Основные стратегические подходы к использованию солнечной энергии можно разделить на три большие группы:

- фотосинтез — создание донорно-акцепторных молекулярных ансамблей и кластеров, моделирующих биологические фотосистемы;

Таблица

Потенциальная мощность (ТВт) возобновляемых источников энергии

Источник	Гидроэнергия	Приливы и течения	Геотермальная энергия	Энергия ветра	Солнечная энергия
Мощность	0,5	2	12	2–4	180 тыс.

— фотокатализ — получение водорода из воды и его использование в топливных элементах;

— фотовольтаика — производство электрического тока с помощью солнечных батарей.

Наибольшее практическое значение имеет последний подход. Пока это единственный реальный способ утилизации солнечной энергии. То, что его доля в энергетическом балансе невелика, обусловлено экономическими причинами. Лучшие солнечные батареи на монокристаллах кремния (1-е поколение) довольно дороги в производстве и установке, а КПД составляет не больше 15%. Устройства 2-го поколения на поликристаллических полупроводниковых тонких пленках CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS) стоят дешевле, но не очень эффективны. Третье поколение солнечных батарей, судя по всему, должно быть высокоэффективным при разумной цене; потенциальные объекты — наноструктурные полупроводники, органико-неорганические гибридные ансамбли, молекулярные ансамбли.

У двух других подходов, фотосинтеза и фотокатализа, много общего. В том и другом под действием света происходит перенос заряда с последующим превращением электрической энергии в химическую (энергию химических связей). Пока оба подхода далеки от практической реализации и находятся в стадии активных научных исследований. Они конкурируют друг с другом в борьбе за финансирование исследований и разработок, за их внедрение и стратегическую роль в энергетике.

В данной статье будет представлена научная составляющая фотосинтетического процесса, рассмотрен искусственный фотосинтез и рассказано о некоторых последних результатах в этой области.

## Природные фотосинтетические устройства

Основное направление работ в области искусственного фотосинтеза — биомиметика, подражание природе, т.е. создание устройств, моделирующих функции природных фотосистем. В недавней статье мы подробно рассматривали первичные стадии фотосинтеза [2], поэтому здесь напомним только основные факты.

Суммарное уравнение фотосинтеза имеет вид:  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{A} + h\nu = \text{CH}_2\text{O} + 2\text{A} + \text{H}_2\text{O}$ , где  $\text{H}_2\text{A}$  — восстановитель, который окисляется до А. В высших растениях, водорослях и цианобактериях восстановителем служит вода, а продуктом фотосинтеза — кислород. Такой фотосинтез называют оксигенным.

Механизм фотосинтеза включает множество стадий, отличающихся по энергии и времени протекания. Строение фотосинтетических устройств и число стадий самого процесса различны у разных организмов, однако три основных — общие [3]:

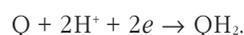
— поглощение света фотоантеннами и *перенос энергии* электронного возбуждения от фотоантенны в реакционный центр;

— *перенос электрона* в реакционном центре и создание состояния с разделенными зарядами;

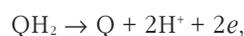
— *химические реакции*, которые приводят к синтезу веществ — первичных (НАДФ и АТФ) и конечных продуктов фотосинтеза.

Энергия при фотосинтезе переходит из одной формы в другую по схеме: световая → электронная → электрическая → химическая.

Лучше всего изучен механизм фотосинтеза, протекающего в пурпурных бактериях (рис.1), поэтому именно он часто служит основой для биомиметических исследований. Бактериальный фотосинтез начинается с поглощения света фотоантенной и заканчивается синтезом АТФ. Фотоантенна представляет собой супрамолекулярный ансамбль молекул-хромофоров. При поглощении видимого или инфракрасного света один из хромофоров переходит в возбужденное электронное состояние и электронная энергия мигрирует по антенне от одного хромофора к другому, пока не достигнет реакционного центра. Там происходит перенос электрона через бислойную мембрану. Он начинается от специальной пары бактериохлорофиллов и включает серию переходов электрона от одного вещества (донора) к другому (акцептору). Конечный акцептор — молекула хинона Q, которая восстанавливается сначала до семихинона QH, а затем, приняв второй электрон, до гидрохинона QH<sub>2</sub>:



Два протона, необходимых для этого, забираются у воды (см. рис.1). Образовавшийся гидрохинон переходит в следующий компонент фотосинтетического устройства — протонный насос, который представляет собой комплекс, содержащий цитохромы *b* и *c*. Этот комплекс окисляет гидрохинон обратно до хинона:



а выделяющаяся при этом энергия используется для переноса ионов водорода через мембрану и создания градиента их концентрации. Цитохром *c* возвращает выделившиеся электроны обратно в реакционный центр и приводит его в ис-

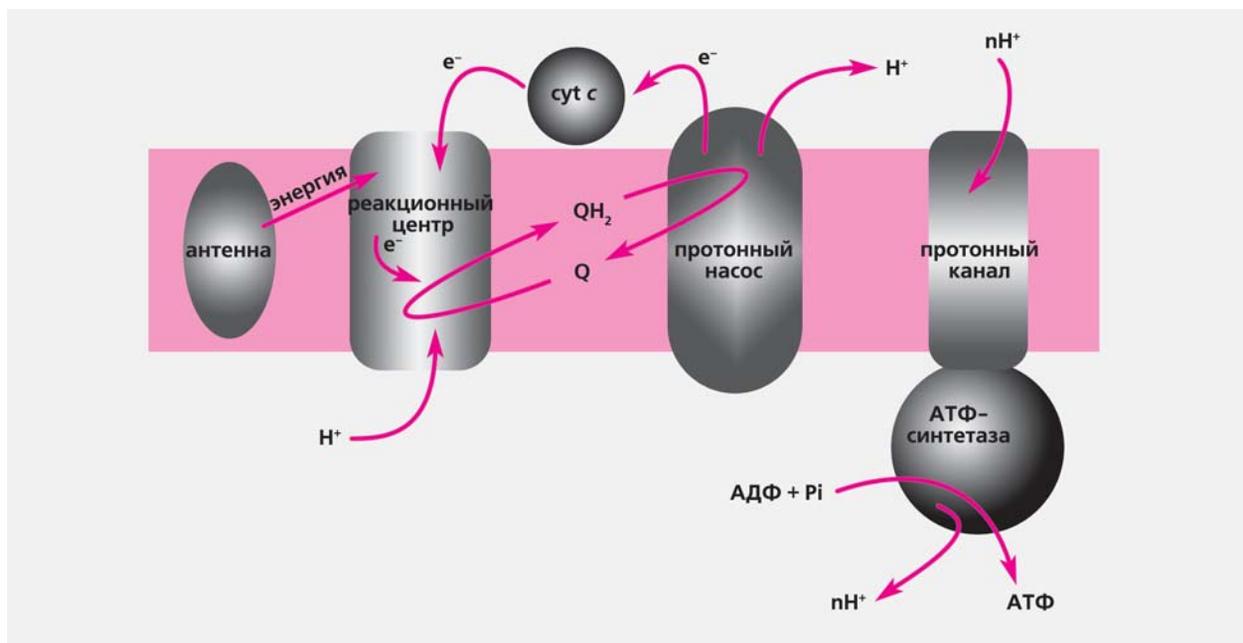
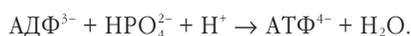


Рис.1. Схема фотосинтеза в пурпурных бактериях [4]. Горизонтальной полосой показана бислоиная мембрана; cyt c — цитохром c; Pi — неорганический фосфат.

ходное состояние. Наконец, фермент АТФ-синтетаза использует протоны, проходящие через мембрану по градиенту концентрации, для синтеза АТФ из АДФ и фосфата:



Эта реакция идет с поглощением большого количества энергии, которая запасается в АТФ и в дальнейшем обеспечивает энергетические потребности бактерии. О важности этого соединения для живых систем свидетельствует такой факт: в спокойном состоянии человеческий организм синтезирует и потребляет 1.5 кг АТФ в час.

Таким образом, у пурпурных бактерий можно выделить основные компоненты природного фотосинтетического устройства:

- *фотоантенна* (отвечает за поглощение света);
- *реакционный центр* (обеспечивает разделение зарядов);
- *система хранения энергии* (в ней происходят химические реакции).

### Энергетика и кинетика переноса зарядов в природных фотосистемах

Основная задача фотосинтетического устройства — превращение световой энергии в химическую. Рассмотрим отдельные стадии этого процесса, представленного в виде упрощенной энергетической диаграммы фотосинтеза в пурпурных бактериях (рис.2). Все стадии переноса электронов че-

рез мембрану по электрон-транспортной цепи — самопроизвольные, они происходят с уменьшением энергии Гиббса. На это расходуется часть световой энергии, поглощенной антенной, —  $\Delta G_{\text{RC}}$ . Оставшаяся часть,  $\Delta G_{\text{chem}}$ , идет на протекание энергетически невыгодных реакций и в конце превращается в энергию фосфат-фосфатной связи в АТФ.

В данной схеме все стадии считаются обратимыми и характеризуются константами скорости прямой  $\gamma_{ij}$  и обратной  $\gamma_{ji}$  реакций. Для  $i = 2 \dots j$  прямая реакция — это перенос электрона от донора к акцептору, обратная — рекомбинация зарядов. Последний процесс невыгоден, так как он уничтожает результат работы реакционного центра по разделению зарядов. Чем меньше константы скорости обратных реакций, тем больше выход раз-

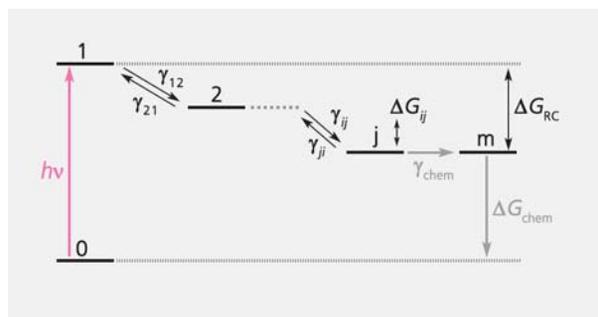


Рис.2. Изменение энергии в процессах фотосинтеза. Цифрами 0 и 1 обозначены основное и возбужденное электронные состояния фотоантенны, а цифрами 2...j — участники процесса переноса,  $\gamma$  — скорость реакции.

деления зарядов и тем выше качество работы реакционного центра.

Константы скорости зависят от многих факторов [5], в первую очередь от расстояния  $r_{ij}$  между донором и акцептором электрона, которое определяет энергию их взаимодействия, а также от изменения энергии Гиббса  $\Delta G_{ij}$ . Все эти факторы необходимо учитывать при создании искусственных реакционных центров. Эффективность их работы оценивают двумя параметрами: квантовым выходом переноса электрона  $\Phi$  и долей световой энергии, превращенной в химическую. Оба параметра можно объединить в общий фактор эффективности [6]:

$$\eta = \Phi \cdot \frac{\Delta G_{\text{chem}}}{h\nu}.$$

Благодаря компьютерной оптимизации кинетики разделения зарядов удалось выяснить, что для достижения максимального выхода  $\Phi$  электрон-транспортная цепь должна содержать не меньше пяти близко расположенных друг к другу веществ [6]. Только так можно получить устойчивое состояние с разделенными зарядами. При меньшем количестве веществ процессы рекомбинации зарядов не позволят достичь этого состояния или сделают его неустойчивым. Именно так устроены реакционные центры пурпурных бактерий: цепь переноса электрона в них включает специальную пару бактериохлорофиллов Р, вспомогательный бактериохлорофилл В, бактериофеофитин Н, хинон Q и цитохром с.

Что касается скоростей отдельных стадий, то квантовый выход оказывается наибольшим, если первые две реакции переноса — самые быстрые (1–2 пс), а третья — самая медленная (около 100 пс). Именно таковы скорости у пурпурных бактерий. Получается, что Природа оптимизировала стадии для достижения высокого квантового выхода, однако в отношении хранения энергии они оказались далеко не оптимальными. В них довольно много поглощенной антенной энергии  $\Delta G_{\text{RC}}$  те-

ряется в каскаде переноса электрона. Поэтому лишь незначительная доля остается на химическую энергию  $\Delta G_{\text{chem}}$ , которая и представляет основной интерес, поскольку служит для запасаания энергии. Так, в пурпурных несерных бактериях *Blastochloris viridis* и *Rhodobacter sphaeroides* при квантовом выходе 97 и 98% фактор эффективности  $\eta$  оказался равным всего 66 и 48% соответственно. Согласно расчетам, искусственный реакционный центр с оптимально подобранными расстояниями и энергиями Гиббса может достичь квантового выхода 93% и фактора эффективности 76% [6].

## Структуры искусственных фотосистем

Искусственная фотосистема для превращения световой энергии в химическую должна, как и природная, содержать три основных компонента: фотоантенну, реакционный центр и систему хранения энергии. Создавая каждый из этих компонентов, решают два главных вопроса:

- из каких веществ — хромофоров, доноров, акцепторов — они должны состоять;
- как, с помощью каких взаимодействий, собрать эти вещества в единую работающую систему?

Фактически необходимо выбрать «строительные блоки» и придумать способ их соединения между собой. Проще всего эта задача решается для искусственных фотоантенн. В качестве хромофоров выбирают металлопорфирины — тетрапиррольные комплексы металлов, а также производные комплексов. Наиболее популярны порфирины с ионами цинка, магния и платиновых металлов, а также свободные порфирины, в которых центральный атом металла отсутствует. Порфирины соединяют в единую фотоантенну методами супрамолекулярной химии [7], т.е. посредством нековалентных взаимодействий (рис.3) либо с помощью ковалентных связей (рис.4). Варьируя пространственную структуру антенны и состав боковых цепей порфиринов, можно управлять потоком энергии по антенне.

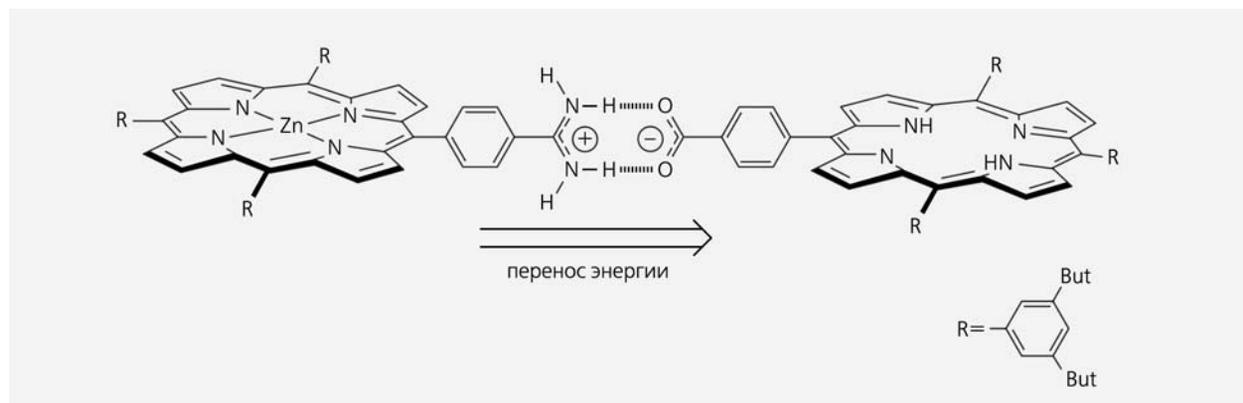


Рис.3. Перенос энергии между двумя порфиринами, соединенными водородной связью.

Методы синтетической органической химии позволяют собирать порфирины в фотоантенны практически любой формы, например цепочечной, циклической [8], как в пурпурных бактериях, фрактальной [9] или дендримерной [10]. Последние два типа — плод фантазии химиков, в природе такие структуры не найдены. Эффективность переноса энергии в искусственных фотоантеннах пока заметно уступает природным аналогам.

Следующая задача состоит в том, чтобы с фотоантенной соединить реакционный центр. Он должен быть устроен таким образом, чтобы в нем осуществлялся перенос электрона на значительное расстояние и образовывалось долгоживущее состояние с разделенными зарядами. В качестве акцепторов электронов могут выступать разнообразные частицы — хиноны, дихиноны [11], нано-

частицы золота [1]. В последнее время в искусственных реакционных центрах все чаще используют фуллерены [4]. Так, в супрамолекулярной гексаде (рис.5) роль фотоантенны выполняют четыре цинк-тетраарилпорфирина  $ZnP$ , а реакционный центр состоит из свободного порфирина  $H_2P$  (донора электрона) и производного фуллерена (акцептора). Электронное фотовозбуждение любого из периферийных порфиринов приводит к переносу энергии на центральный порфирин за 50 пс. От фотоантенны электронная энергия передается к свободному порфиру за 240 пс, с которого за 3 пс электрон переходит на фуллерен. Эти параметры близки к природным. Состояние с разделенными зарядами  $(ZnP)_4-H_2P^+-C_{60}^-$  образуется с квантовым выходом 70% и оказывается весьма устойчивым — его время жизни составляет

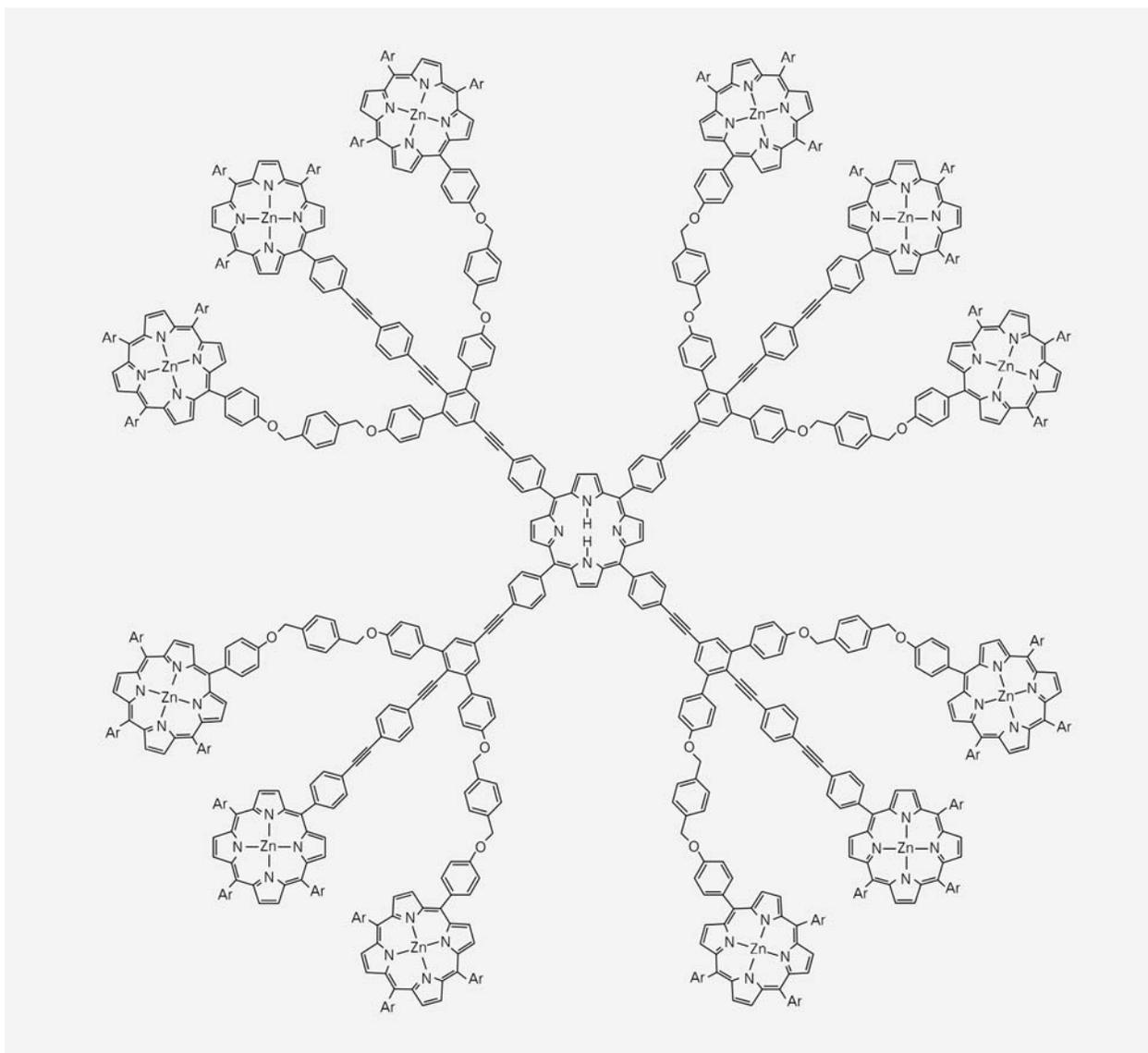


Рис.4. Дендримерная фотоантенна, в которой происходит перенос электронной энергии от периферийных  $ZnP$ -порфиринов к свободному порфиру в центре [5].

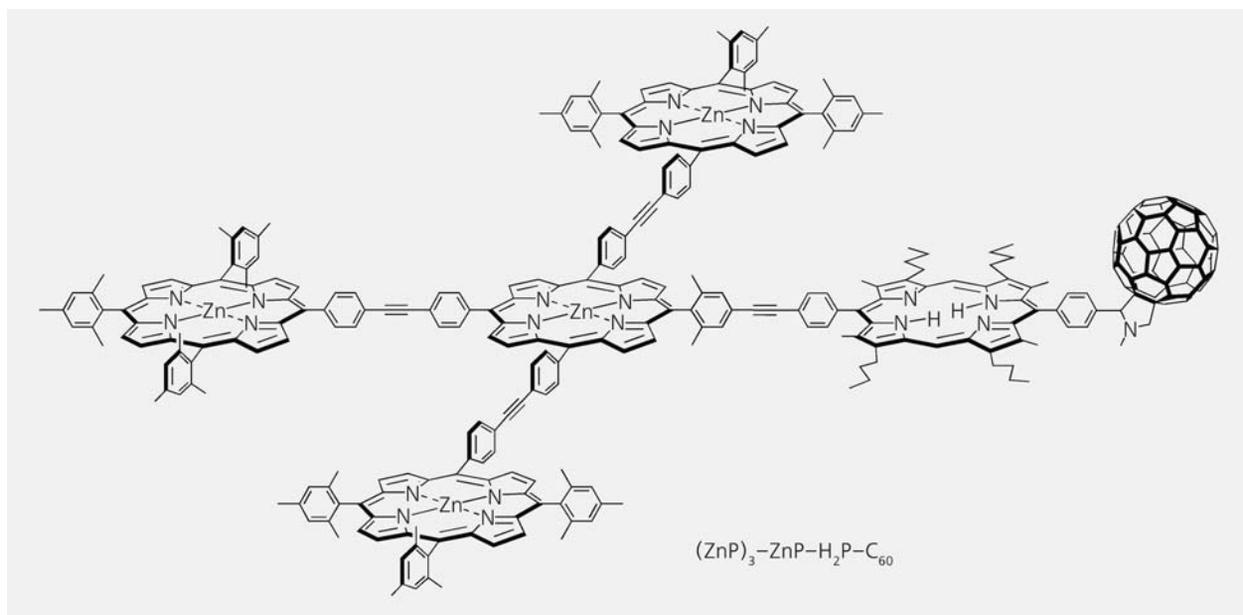
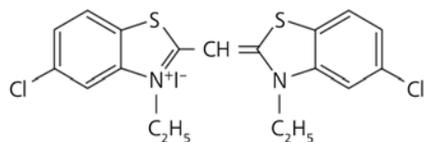


Рис.5. Супрамолекулярная гексада, моделирующая реакционный центр, соединенный с фотоантенной [4].

1.3 нс [4]. Таким образом, данная супрамолекулярная структура моделирует все основные функции природных комплексов «фотоантенна — реакционный центр», хотя по количественным характеристикам заметно им уступает.

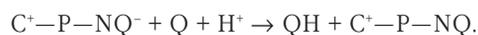
Создание искусственных ансамблей «фотоантенна — реакционный центр» — область очень активного научного поиска. В 2008 г. было предложено интересное решение этой проблемы. В качестве каркаса для фотоантенны использовали спираль амилозы (компонента крахмала), модифицированной кислотными группами, а реакционный центр разместили внутри спирали [12]. Хромофором был цианиновый краситель, соединенный с внешней поверхностью спирали:



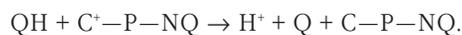
Роль реакционного центра выполняли два других красителя, содержащие длинные углеводородные цепи; один из них служил донором, другой — акцептором. Весь комплекс получен в водном растворе методом самосборки. Эффективность переноса энергии от хромофоров к реакционному центру и переноса электрона в последнем оценивали по степени тушения флуоресценции красителей. Сообщается, что квантовый выход переноса электрона в этом искусственном супрамолекулярном устройстве составляет 90%.

Наконец, последняя задача, которая стоит на пути создания искусственных фотосинтетичес-

ких устройств, — обеспечить хранение энергии, запасенной в системе с разделенными зарядами. Первый шаг на этом пути — организовать трансмембранный протонный насос, аналогичный бактериальному. Вот как это было сделано [4]. В насосе использовали два типа молекул: триаду каротиноид—порфирин—нафтохинон С—Р—NQ, моделирующую реакционный центр, и дифенилхинон Q. Эти молекулы были растворены в липидном бислое липосомы диаметром около 150 нм. При поглощении света электрон с каротиноида через порфирин переходил на нафтохинон и возникало состояние с разделенными зарядами С<sup>+</sup>—Р—NQ<sup>-</sup>. Эта молекула своим нафтохинонным концом восстанавливала хинон до семихинона, захватывая протон из водного раствора с внешней стороны мембраны:



Образовавшийся семихинон QH мигрировал к внутреннему слою мембраны, где встречался с положительным концом триады С<sup>+</sup>—Р—NQ и окислялся им обратно до хинона. При этом протон выделялся во внутреннюю часть липосомы и реакционный центр-триада возвращался в исходное состояние:



Суммарный результат этих двух процессов — перенос протона через мембрану липосомы и регенерация реакционного центра. Такой протонный насос позволяет достичь разницы  $\Delta\text{pH} = 2$  между внутренней и внешней областями липосомы и поддерживать эту разницу в течение 4 ч. Общая свободная энергия, запасаемая насосом, со-

ставляет около 4 ккал/моль ионов  $H^+$ . Если в мембрану липосомы внедрить, используя биохимические методы, молекулу фермента АТФ-синтетазы, то данный липосомный комплекс будет способен под действием видимого света производить АТФ в растворе, содержащем АДФ и фосфат. При малых интенсивностях света одна молекула АТФ образуется за счет 14 перенесенных протонов, что соответствует квантовому выходу 15%. При большей интенсивности наступает насыщение — в этом режиме фермент АТФ-синтетаза в составе данного биомиметического комплекса катализирует производство около 100 молекул АТФ в секунду.

\* \* \*

На примере липосомной системы можно видеть, что существующие в настоящее время искусственные фотосинтетические устройства способны выполнять все функции простейших природных аналогов: поглощение света, конверсию световой энергии путем многостадийного переноса электрона, накачку протонов в окислительно-восстановительном цикле, синтез веществ, обладающих запасом энергии (АТФ). При этом компоненты искусственных систем устроены значительно проще, чем их природные конкуренты.

Современное состояние проблемы искусственного фотосинтеза таково, что принципиально решен вопрос синтеза отдельных узлов фотосистемы (фотоантенны, реакционного центра и системы хранения энергии) и их соединения друг с другом. Задача теперь в том, чтобы улучшать характеристики этих систем, сохранив их основное преимущество перед природными — простоту организации. Необходимо увеличить, в частности, квантовый выход и долю конверсии световой энергии в химическую. Это потребует многопараметрической оптимизации архитектуры фотоантенн [13] и тонкой настройки электронных взаимодействий между хромофорами в фотоантенне,

а также между донорами и акцепторами в реакционном центре. В последнем случае надо добиваться того, чтобы перенос электрона протекал как можно быстрее, а обратный процесс — рекомбинация зарядов — по возможности был медленнее. Это достижимо, если варьировать расстояние между донором и акцептором или менять свойства среды, в которой находится фотосистема. В природных фотосистемах роль среды выполняют сложные белковые молекулы гибкой пространственной структуры и с большим разнообразием функциональных групп разного характера.

Уже испытаны различные подходы к объединению молекулярных комплексов в единую фотосистему. Это может быть самосборка, как в случае липосомного комплекса или спиральной фотосистемы на основе амилозы. Возможен и направленный ковалентный синтез, подобный тому, который используется для получения различных комплексов «фотоантенна — реакционный центр».

Итак, биомиметические фотосинтетические системы способны производить АТФ под действием света. С учетом огромной энергетической роли этого вещества они имеют большое число потенциальных приложений в биологии, таких как создание искусственных ферментов и молекулярных моторов. В энергетике такие системы могут быть использованы в составе электрических цепей или в фотохимических источниках тока. Пока работы в этой области несут только исследовательский характер и не так близки к практической реализации, как, например, солнечные батареи нового поколения. Однако они очень интересны с фундаментальной точки зрения, так как помогают лучше понять замыслы Природы и, поняв, использовать лучшие из них для производства «чистой» энергии. Неизвестно только, как много времени на это потребуется — ведь Природа оттачивала свои фотосистемы сотни миллионов лет, а человек интересуется ими меньше столетия [14]. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-03-00889) и Федерального агентства по образованию (госконтракт Р2280).**

## Литература

1. *Kamat P.V.* // J. Phys. Chem. C. 2007. V.111. №7. P.2834—2860.
2. *Еремин В.В.* С чего начинается фотосинтез? // Природа, 2008. №12. С.3—10.
3. *Рубин А.Б.* Биофизика. М., 1999. Т.1. Гл.13; Т.2. Гл.27.
4. *Gust D., Moore T.A., Moore A.L.* // Acc. Chem. Res. 2001. V.34. №1. P.40—48.
5. *Еремин В.В.* Квантовая динамика окислительно-восстановительных реакций // Природа. 2006. №5. С.15—22.
6. *Fingerhut B.P., Zinth W., Vivie-Riedle R.de* // Chem. Phys. Lett. 2008. V.466. P.209—213.
7. *Beletskaya I., Tyurin V.S., Tsvadze A.Yu. et al.* // Chem. Rev. 2009. V.109. №5. P.1659—1713.
8. *Yoon M.-C., Yoon Z.S., Cho S. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2007. V.111. №38. P.9233—9239.
9. *Scolaro L.M., Romeo A., Castriciano M.A., Micali N.* // Chem. Commun. 2005. P.3018—3020.
10. *Kozaki M., Uetomo A., Suzuki S., Okada K.* // Org. Lett. 2008. V.10. №20. P.4477—4480.
11. *Gust D., Moore T.A., Moore A.L.* // Acc. Chem. Res. 1993. V.26. №4. P.198—205.
12. *Kim O.-K., Melinger J., Chung S.-J., Pepitone M.* // Org. Lett. 2008. V.10. №8. P.1625—1628.
13. *Белов А.С., Еремин В.В.* // Вестник МГУ. Сер. Химия. 2008. Т.63. С.219—225.
14. *Ciamician G.* // Science. 1912. V.36. P.385—394.

# Молекулярный мотор мышц

А.В.Воротников, Н.А.Кубасова, А.К.Цатурян

Как известно, все мышцы нашего организма — скелетные, сердечная и гладкие — приводятся в действие актин-миозиновым молекулярным мотором. Существует целое семейство белков, называемых миозинами, которое насчитывает по крайней мере 24 различных класса. Миозины мышц относятся ко II классу, остальные миозины обеспечивают другие виды клеточных движений. Все эти белки содержат однотипный моторный домен, способный обратимо связываться с актиновыми нитями и перемещаться вдоль них, используя свободную энергию гидролиза аденозинтрифосфорной кислоты — АТФ (рис.1). Таким образом, в молекулярном моторе мышц миозин служит локомотивом, который движется по актиновым рельсам, а АТФ — горючим. Пять лет назад в «Природе» рассказывалось об основных принципах организации двигательных реакций клеток сердечно-сосудистой системы и предполагаемых функциях их миозинового мотора [1]. Здесь мы постараемся описать современные представления о работе молекулярного мотора, который обеспечивает сокращение мышц.

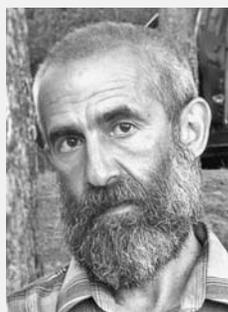
Несмотря на свои микроскопические, по сравнению с рукотворными двигателями, размеры, актин-миозиновый мотор превосходит их по эффективности. Он преобразует химическую энергию экологически безвредного топлива с КПД 50—80%, т.е. большим, чем у дизеля, двигателя



**Александр Вячеславович Воротников**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник факультета фундаментальной медицины Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Занимается изучением роли фосфорилирования белков в регуляции гладкомышечного сокращения и клеточной подвижности, внутриклеточных механизмов двигательной активности клеток.



**Наталья Александровна Кубасова**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биомеханики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — теоретическая и экспериментальная биомеханика и биофизика, молекулярные механизмы мышечного сокращения.



**Андрей Килович Цатурян**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Более 20 лет изучает молекулярные механизмы мышечного сокращения.

внутреннего сгорания или газовой турбины. Чтобы создать такой двигатель, природе пришлось решить ряд непростых задач. Во-первых, нужно преобразовать малые ( $\sim 0.1$  нм =  $10^{-10}$  м) перемещения атомов при гидролизе молекулы АТФ в крупномас-

штабные, на два порядка большие, движения мотора. Без этого невозможна необходимая деформация (относительное укорочение), составляющая для скелетных и сердечных мышц десятки, а для некоторых гладких мышц даже сотни процентов их

длины. Механическое напряжение скелетных мышц (сила, отнесенная к площади поперечного сечения), достигает 4 атм, а удельная мощность — 400 Вт/кг. Чтобы получить такие характеристики, необходимы специальные конструкции, позволяющие эффективно складывать силы и перемещения отдельных молекул и адаптировать их к специфическим условиям работы мышц каждого типа. Наконец, нужны системы управления, позволяющие эффективно включать и выключать молекулярные моторы и подстраивать их работу под текущие нужды конкретного органа и всего организма.

## Детали

*Актин* — глобулярный белок массой 42 кДа — в результате полимеризации образует нить, длина которой может достигать нескольких микрометров. Атомную структуру мономера актина

определили с помощью рентгеновской дифракции и предложили модель нити: спираль с осевым шагом 2.73 нм, углом поворота между соседними мономерами 167° и полным периодом около 36 нм (рис.1). Истинно атомную модель получили недавно [2] и выяснили, что при полимеризации мономеры актина деформируются, поэтому поддерживать движение миозина способны только нити.

*Мышечный миозин* образован двумя тяжелыми цепями массой по 210 кДа, с каждой из которых ассоциированы две легкие цепи массой около 20 кДа (рис.1). Переплетение хвостовых  $\alpha$ -спиральных участков тяжелых цепей формирует суперспиральные стержни, которые полимеризуются в толстый миозиновый филамент. На другом конце тяжелые цепи расходятся, образуя две глобулярные головки (длина около 15 нм), называемые субфрагментами-I (S1). Именно S1 расцепляет АТФ и связывается с ак-

тином, т.е. является основным узлом мотора.

С 1993 г., когда с помощью белковой кристаллографии определили первую атомную структуру S1, удалось расшифровать десятки структур S1 всевозможных миозинов в различных состояниях, что и послужило основой современных представлений о молекулярном механизме работы миозинового мотора [3]. Так называемая шея головки, состоящая из длинных  $\alpha$ -спиральных участков тяжелой цепи и ассоциированных с ней легких цепей (рис.1), служит рычагом, передающим перемещения от мотора к стержневому хвосту миозина. В собственно моторном участке головки есть несколько доменов, ответственных за связывание актина, АТФ или продуктов его гидролиза. Актин-связывающий участок образован двумя доменами — верхней и нижней *челюстями*, между которыми расположена *пасть* (рис.1). АТФазный *карман* находится над верхней челюстью в 3–4 нм от пасти и вблизи 7-заходного  $\beta$ -листа: это рама, к которой крепятся основные детали мотора. Нижняя челюсть также связана с АТФазным центром через переключатель. Все детали могут двигаться относительно друг друга, и их согласованные перемещения приводят в действие мотор.

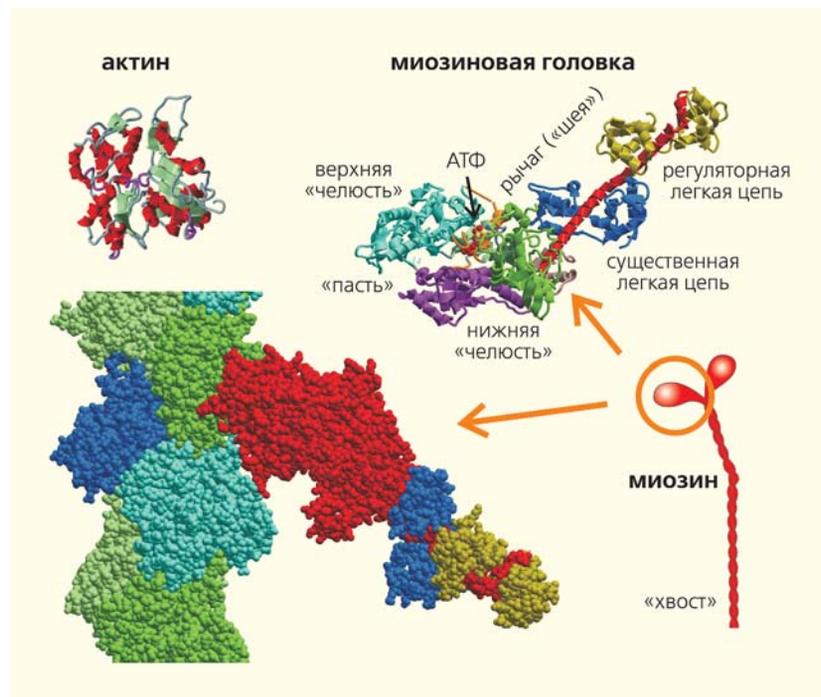


Рис.1. Структура актинового мономера (слева сверху). Внизу — фрагмент актиновой нити с прочно присоединенным к ней S1 миозина (различные мономеры нити, а также фрагмент тяжелой цепи и легкие цепи S1 раскрашены в разные цвета). Справа — молекула миозина и ее головка (S1).

## Функционирование

Головки миозина максимально прочно связываются с актином, когда АТФазный центр пуст или содержит только АДФ. Лишь когда верхняя и нижняя челюсти сближены и пасть закрыта, актин-связывающий участок головки комплементарен соответствующей поверхности актина (рис.1, 2). При этом верхняя челюсть поворачивается и открывает АТФазный карман. Таким образом, АТФазный и актин-связывающий центры S1 функционируют согласованно. При исто-

щении АТФ все миозиновые головки прочно присоединяются к актину и мышца становится очень жесткой — наступает трупное окоченение.

После захвата АТФ прочность связывания головки с актином падает почти в 1 тыс. раз, потому что при этом карман закрывается и, соответственно, раскрывается пасть. Тогда субфрагмент S1 может легко отсоединиться от актина, а затем присоединиться к другому мономеру. Для гидролиза АТФ необходимо, чтобы АТФазный карман был полностью закрыт, лишь в этом случае связь между  $\gamma$ -фосфатом и АДФ ослабевает, без чего АТФ не расщепляется.

Свободная энергия гидролиза АТФ составляет около  $10^{-19}$  Дж. Однако в миозиновой головке гидролиз АТФ легко обратим, что соответствует разности свободных энергий всего в  $10^{-20}$  Дж. Остальная энергия запасается внутри головки в момент захвата АТФ. Значит, первая стадия механохимического преобразования энергии — именно связывание АТФ. Перемещения отдельных деталей S1 при захвате АТФ невелики, но возникающие внутренние напряжения весьма значительны: мотор заряжается, готовясь преобразовать запасенную энергию в механическую работу при взаимодействии с актином [3].

Изменение прочности связи миозиновой головки с актином обеспечивает цикличность работы мотора. После гидролиза АТФ головка полностью заряжена и готова к работе. Если актин по той или иной причине недоступен, продукты гидролиза АТФ надолго остаются в активном центре, пока в результате крупномасштабной, но редкой флуктуации АТФазный карман не откроется сам и продукты гидролиза не покинут его. Лишь после этого S1 может связать новую молекулу АТФ. Благодаря такому медленному сбросу продуктов в расслабленной мышце расщепляется всего две молекулы АТФ в минуту и расход горячего

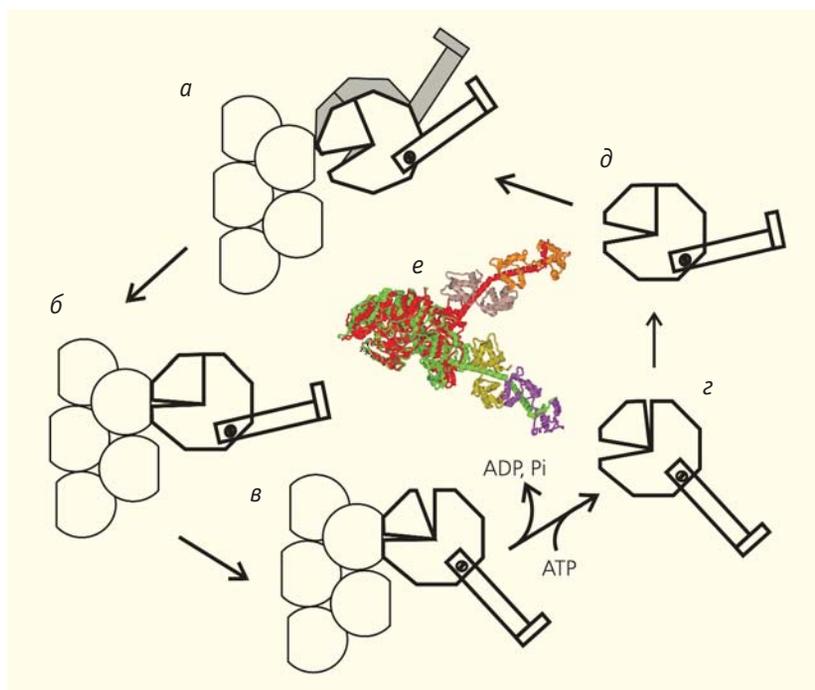


Рис.2. Схема цикла работы актин-миозинового мотора. В центре — две полученные в отсутствие актина атомные структуры S1 с открытой пастью, различающиеся поворотом рычага. Они соответствуют состояниям (г) и (д) на схеме. В слабосвязанном с актином состоянии (а) миозиновая головка может присоединяться под разными осевыми и азимутальными углами. Серым показана одна из множества возможных конфигураций головки.

на холостом ходу мотора мал. Взаимодействие головки с актином, резко ускоряющее сброс фосфата, происходит в несколько этапов. На первом — слабо и нестереоспецифически, через гибкие поверхностные петли, несущие противоположно заряженные атомы. Угол между S1 и нитью актина может при этом заметно варьировать (рис.2,а). На втором этапе челюсти смыкаются и связь с актином становится прочной и стереоспецифической, т.е. белки соединяются комплементарными поверхностями как ключ в замке (рис.2,б). Почему присутствие актина способствует закрытию пасти S1, пока неизвестно, поскольку все атомные структуры миозиновых головок были получены в отсутствие актина. Однако ясно, что при закрытии пасти верхняя челюсть поворачивается и АТФазный карман частично раскрывается.

На следующем этапе запасенная энергия высвобождается и превращается в механическую работу (рис.2,в). Образование прочного комплекса S1 с актином и закрытие пасти также облегчает движение переключателя, соединяющего нижнюю челюсть с АТФазным центром. Перемещения переключателя всего на 0.2 нм вызывают крупномасштабную перестройку всей миозиновой головки. Движение переключателя передается к нижней челюсти S1, и петля, находящаяся в контакте с жестким доменом рычага (конвертером), поворачивается на  $60^\circ$ , перецелкиваясь в энергетически более выгодное положение. Поскольку длина рычага составляет 8 нм, такой поворот вызывает смещение его конца на 10 нм — расстояние, во много раз превосходящее перемещение переключателя (рис.2,е). Именно поворот рычага вдоль оси актина

и есть элементарный шаг миозинового мотора.

После того как в результате поворота верхней челюсти и срабатывания переключателя АТФазный карман полностью открывается, продукты гидролиза легко его покидают, освобождая место для новой молекулы АТФ (рис.2,з). Актин ускоряет гидролиз АТФ головкой миозина до 40 молекул/с, что в 100 раз быстрее, чем в его отсутствие. В свою очередь, связывание АТФ и закрытие кармана раскрывает пасть, связь головки с актином ослабевает, и она легко отсоединяется. После захвата новой молекулы АТФ карман закрывается, втягивает в себя переключатель и рычаг возвращается в исходное положение (рис.2,д). Теперь мотор вновь заряжен и готов к новому циклу работы с участием другого мономера актина.

Насколько эта схема, построенная в результате анализа замороженных кристаллических

структур S1 в отсутствие актина, отражает реальные события? Можно ли увидеть движения молекулярных моторов в работающей мышце? Для ответа на эти вопросы рассмотрим конструкцию сократительного аппарата мышечной клетки и то, как движения и усилия отдельных молекул складываются в весьма ощутимую работу.

### Конструкция

В скелетной и сердечной мышцах толстые нити миозина (диаметр ~17 нм, длина 1.6 мкм) и филаменты актина (диаметр ~10 нм, длина 1 мкм) вместе формируют упорядоченные структуры, саркомеры, которые ограничены Z-дисками. Соседние саркомеры соединены последовательно в миофибриллы (диаметр ~1 мкм), протянувшиеся от одного конца клетки к другому, и передают усилие соседним клеткам.

Толстые нити, сформированные хвостовыми участками миозиновых молекул, образуют симметричную структуру (рис.3). Головки миозина выступают из толстой нити в виде ярусов с периодичностью в 14.5 нм. Каждый ярус образован тремя молекулами (и, соответственно, шестью S1) миозина. Благодаря правильной гексагональной упаковке нитей актин находится в непосредственной близости от миозиновых головок. При сокращении толстые и тонкие нити скользят относительно друг друга без изменения длины. Миозиновые головки служат элементарными генераторами силы, которая развивается отдельными мостиками. Все силы затем складываются. Длина полусаркомера равна ~1 мкм, а шаг миозиновой головки — 10 нм, поэтому после взаимодействия с актином он укорачивается примерно на 1%.

Высокоупорядоченная квазикристаллическая структура саркомеров позволяет изучать

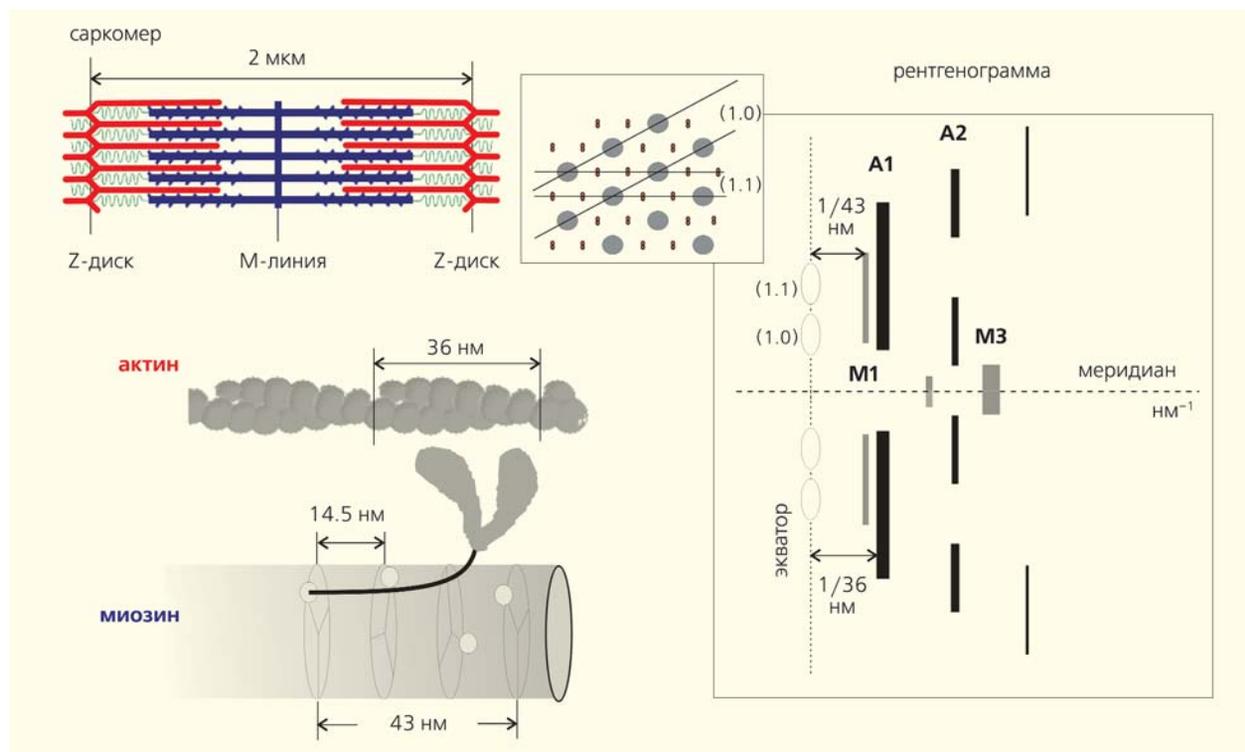


Рис.3. Схема строения саркомера. Внизу — спиральная структура актиновой и миозиновой нитей. Справа: схема рентгенодифракционной картины мышцы. На врезке — упаковка толстых (миозиновых) и тонких (актиновых) нитей в зоне их перекрывтия.

движения молекулярных моторов в работающей мышце, регистрируя их по дифракции рентгеновских лучей [4]. Из-за присутствия в образце упорядоченных структур лучи, рассеянные соседними структурами в некоторых направлениях, имеют одинаковую фазу и складываются. Поскольку при дифракции меньший период структуры вызывает большие углы, пространство рассеяния получается обратным — большим расстояниям соответствуют меньшие углы рассеяния и наоборот. На рентгеновской пленке или детекторе рентгеновских фотонов возникают максимумы интенсивности, называемые рентгеновскими рефлексами. Рефлексы, возникающие из-за рассеяния на плоскостях, образованных толстыми и тонкими нитями, называют экваториальными (рис.3). Наиболее яркие из них обусловлены дифракцией на семействах плоскостей 1,0, где участвуют только миозиновые нити, и семействах плоскостей 1,1, проходящих через как миозиновые, так и через актиновые нити. При сокращении движение миозиновых головок от толстых нитей к тонким актиновым снижает интенсивность рефлекса 1,0 и увеличивает яркость рефлекса 1,1.

Осевая периодичность миозиновых головок, выступающих из толстых нитей, вызывает яркий меридиональный рефлекс МЗ (рис.3). Чем точнее головки следуют осевому периоду в 14,5 нм и чем перпендикулярнее они по отношению к оси нитей, тем этот рефлекс ярче. Значит, по изменению интенсивности рефлекса МЗ можно отслеживать поворот миозиновых головок в процессе сокращения.

Менее яркие, но весьма информативные рефлексы возникают и при дифракции лучей на актиновых нитях. Из-за периодичности, свойственной актиновой спирали, появляются слоевые линии, расположенные параллельно экватору на расстояниях, кратных обратному

периоду актиновой спирали (36 нм). При прочном и стереоспецифическом взаимодействии с актином миозиновые головки встраиваются в актиновую спираль и интенсивность слоевых линий возрастает. При этом интенсивность рефлекса А1 не меняется при повороте рычага S1 относительно его моторной части, если, конечно, последняя прочно связана с актином. В связи с этим интенсивность А1 можно использовать для определения числа миозиновых головок, прочно связанных с актином. Другие актиновые слоевые линии более чувствительны к изменению формы S1, поэтому с их помощью можно проследить тонкие детали движений головок [5].

Современные источники синхротронного излучения создают пучок монохроматических рентгеновских лучей до  $5 \cdot 10^{13}$  фотонов/с, диаметр которых (0,2—0,3 мм) сравним с сечением мышечного волокна. Это позволяет получать рентгенодифракционное «кино» одиночного волокна с разрешением 1000 кадров/с, а для наиболее яркого рефлекса МЗ достичь рекордного временного разрешения 0,02 мс [6]. Синхронизировать движения отдельных моторных молекул можно с помощью действия внешних импульсов на волокно: быстрыми ступенчатыми изменениями его длины [4, 6], субмиллисекундным скачком температуры [7], фотолитическим выделением АТФ из ее ловушки под действием вспышки света ультрафиолетового лазера [4]. Такие эксперименты показали, что структурные изменения миозиновых головок не исчерпываются поворотом их рычагов относительно доменов S1, прочно связанных с актином. Оказалось, что переход от слабого к прочному стереоспецифическому контакту тесно связан с развиваемой ими силой, например, в ответ на скачок температуры. На основе этих данных предложена модель, со-

гласно которой молекулярный мотор развивает силу в два этапа: сначала происходит стереоспецифическое *застегивание* S1, сопровождаемое его поворотом, а затем рычаг поворачивается относительно моторной части S1 [8] (рис.2).

## Управление

**Регуляция на молекулярном уровне.** Регуляция всех мышечных актин-миозиновых моторов обеспечивается доступностью моторных частей миозина для актина. Выделяют актиновый и миозиновый тип регуляции сокращения. Однако в любом случае пусковое событие — связывание ионов  $Ca^{2+}$  с молекулами-мишенями, которые передают сигнал сократительному аппарату и разрешают взаимодействие миозина с актином, активируя сокращение. В *поперечно-полосатых скелетных мышцах* и в *сердце* миозин постоянно активен, а в *покоящейся мышце* его взаимодействие с актином блокирует тропонин-тропомиозиновый комплекс.

Тропонин служит акцептором  $Ca^{2+}$  и регулятором тропомиозина, который и контролирует цикл поперечных мостиков. Этот белок состоит из трех субъединиц: тропонин-Т обеспечивает взаимодействие тропомина с тропомиозином, тропонин-С обратимо присоединяет ионы  $Ca^{2+}$ , а тропонин-И связывает тропонин-тропомиозиновый комплекс с актином и ингибирует АТФазный цикл актомиозина, закрывая на актине места связывания. Тропомиозиновый комплекс связан с одной молекулой тропомиозина, который распространяет действие одного тропомина на семь соседних мономеров актина и даже дальше — на следующую тропонин-тропомиозиновую регуляторную единицу. В гладких мышцах функциональная единица образована продольным димером тропомиозина, что

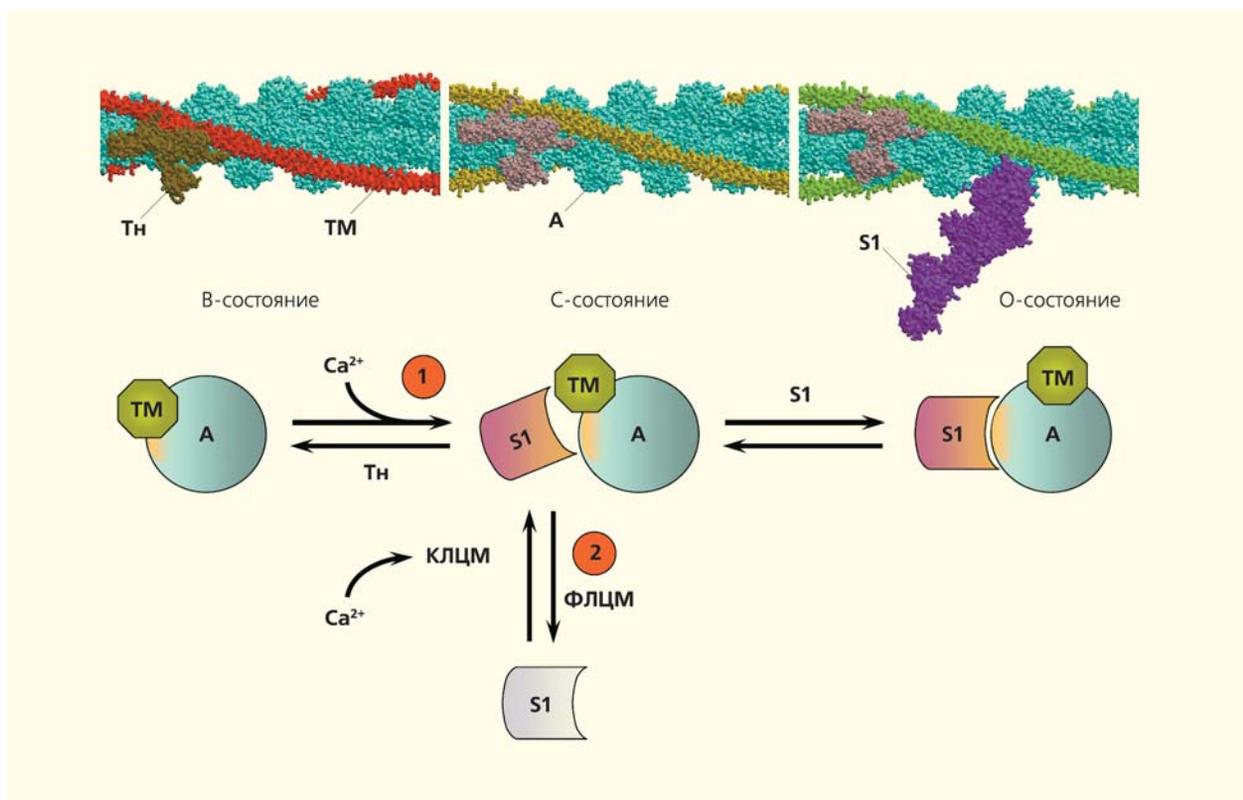


Рис.4. Регуляция актин-миозинового мотора. Вверху — структуры тонкой нити, соответствующие ее блокированному (В), закрытому (С) и открытому (О) состояниям. Внизу — модель аллостерической регуляции актин-миозинового взаимодействия, согласно которой тропонин (Тн) и сам миозин (S1) регулируют переход между этими состояниями в поперечно-полосатых мышцах и действие тропонина зависит от  $\text{Ca}^{2+}$ . В гладких мышцах необходима активация миозина  $\text{Ca}^{2+}$ /кальмодулин-зависимой или другими киназами легких цепей миозина (КЛЦМ), а функции тропонина выполняет кальдесмон. Красным отмечено, что активность тропонин/кальдесмона (1) и уровень фосфорилирования миозина (2) находятся под контролем клеточных механизмов второго порядка. А — актин, ТМ — тропомиозин, ФЛЦМ — фосфатаза легких цепей миозина.

обеспечивает регуляцию группы из 14 мономеров актина.

Тропомиозин — относительно жесткий  $\alpha$ -спиральный белок длиной 40 нм. Его соседние молекулы, прочность связи которых усиливается тропонином, полимеризуются по принципу «голова-к-хвосту» и образуют два продольных тяжа, тянущихся с двух сторон актиновой нити. Конфигурация поверхности актинового филамента и распределение на ней заряженных аминокислот позволяют каждому из двух тяжей тропомиозина скользить по актину с малыми затратами энергии. Под действием тропонина или головок миозина тропомиозин прочно фиксируется в определенных положениях, которые задают

функциональное состояние актинового филамента.

Электронно-микроскопические и рентгенодифракционные исследования показали, что связывание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  с тропонином-С вызывает поворот тропомиозинового тяжа на актиновом филаменте. Эти результаты легли в основу широко известной теории стерического блокирования, согласно которой в расслабленной мышце тропомиозин закрывает на актине миозин-связывающие участки, а при сокращении открывает их. Полученные позже данные не только подтвердили эту модель, но и дали дополнительную информацию [9]. В отсутствие  $\text{Ca}^{2+}$  тропомиозин находится преимущественно в

положении, блокирующем участки связывания миозина на актине (В-состояние). После связывания с  $\text{Ca}^{2+}$  тропонин-С перемещает тропомиозин внутрь продольной борозды, образуемой актиновыми мономерами. При этом миозин-связывающие участки частично освобождаются (С-состояние). Последующее присоединение миозиновых головок к актину перемещает тропомиозин в полностью открытое О-состояние (рис.4). Такой переход соответствует стереоспецифическому застегиванию головок на актине, предшествующему рабочему шагу миозина. Кинетический анализ АТФазы регулируемого актомиозина показывает, что эти три состояния актиновой

нити находятся в быстром равновесии, а доля каждого из них определяется действиями тропонина и миозина [10]. В целом актиновый тип регуляции представляет собой классическую аллостерическую систему.

Описанная трехшаговая модель актиновой регуляции предполагает, что основной регуляторный переключатель — тропомиозин, а структура актина неизменна. Но сейчас выяснилось, что и связывание  $\text{Ca}^{2+}$  с тропонином, и присоединение миозиновых головок к актину приводят к локальным и глобальным перестройкам актина.

Миозин гладких мышц, обеспечивающих работу сосудистой, пищеварительной, дыхательной, зрительной, выделительной и репродуктивной систем, очень похож на миозин поперечно-полосатых мышц. Однако малые отличия в первичной структуре меняют механизм регуляции сокращения гладких мышц. В отличие от миозина поперечно-полосатых мышц, регуляторные легкие цепи двух головок гладкомышечного миозина могут прилипнуть друг к другу и к стержневому участку другой молекулы миозина в составе филамента. Это иммобилизует моторные домены и отдаляет их от актиновой нити. Взаимодействие таких головок с актином невозможно без разрыва этих связей [11].

Таким образом, в покоящейся гладкой мышце миозин преимущественно выключен и требует предварительной активации. Природный механизм активации такого крупного белка заключается в фосфорилировании единственного остатка его легкой цепи. В клетке в этом процессе участвует группа ферментов, основной из которых — киназа легких цепей миозина (КЛЦМ). Акцептором  $\text{Ca}^{2+}$ -сигнала служит белок кальмодулин: в  $\text{Ca}^{2+}$ -связанном состоянии он взаимодействует с киназой легких цепей и активирует ее. Миозин — единственный субстрат этого фермен-

та, который фосфорилирует его на порядок быстрее, чем другие киназы миозина. Появление отрицательного заряда в регуляторных легких цепях приводит к крупным конформационным изменениям: две головки перестают взаимодействовать друг с другом и основанием филамента и приобретают относительную независимость, получая способность связываться с актином.

Установлено, что в гладких мышцах преобладает миозиновый тип регуляции, а актиновый, представленный комплексом тропомиозина с гладкомышечным аналогом тропонина (белком кальдесмоном и  $\text{Ca}^{2+}$ -связывающим белком кальмодулином), играет вспомогательную роль. Кальдесмон функционирует подобно комплексу тропонина-I и тропонина-T, а кальмодулин служит эквивалентом тропонина-C. Связанный с  $\text{Ca}^{2+}$  кальмодулин вызывает смещение кальдесмона и делает актин доступным для взаимодействия с головками миозина. Таким образом, кальмодулин-кальдесмоновый комплекс работает с тропомиозином как тропонин-тропомиозиновая система поперечно-полосатых мышц [12].

Смещение баланса в пользу миозинового типа регуляции, характерное для гладких мышц, связано с неспособностью кальдесмона прочно фиксировать актин-тропомиозиновый филамент в выключенном В-состоянии, как это делает тропонин I. Большая часть филаментов пребывает в частично активном С-состоянии и при высокой степени фосфорилирования миозин эффективно связывает актин и смещает тропомиозин, переводя актиновый филамент во включенное О-состояние. Поэтому большинство физиологических механизмов регуляции сокращения гладких мышц направлено на изменение уровня фосфорилирования регуляторных легких цепей миозина, тогда как кальдесмон-направ-

ленная регуляция носит второстепенный характер.

## Механизмы регуляции сокращения на клеточном уровне

Клеточные механизмы обеспечивают «регуляцию регуляторов» актомиозинового мотора. Они включают активацию мембранных рецепторов и внутриклеточную передачу сигнала от них к эффекторным протеинкиназам, которые фосфорилируют регуляторные белки сократительного аппарата, т.е. перенесут остаток фосфата в определенные участки белков, изменяя их свойства и, опосредованно, активность актин-миозинового мотора.

В миокарде, где главную роль играет актиновый тип регуляции сокращения, регуляция второго порядка направлена на тропонин и происходит в основном под действием цАМФ-зависимой протеинкиназы. Этот фермент реализует гормональный контроль сократимости миокарда  $\beta_2$ -адренэргическими рецепторами, которые служат основной мишенью кардиоселективных лекарственных препаратов. Фосфорилирование тропонина-I снижает сродство тропонина к  $\text{Ca}^{2+}$ , уменьшает  $\text{Ca}^{2+}$ -чувствительность миофиламентов и силу сердечных сокращений при физиологических концентрациях внутриклеточного  $\text{Ca}^{2+}$ .

Работа скелетных мышц связана с максимально быстрым развитием сокращения высокой силы и эффективным расслаблением. Механизмы гормонального контроля их сокращения сильно редуцированы, и тропонин в них практически не фосфорилируется.

Функции гладких мышц значительно многообразнее, и рецептор-зависимая регуляция их активности имеет важное значение. Она направлена на контроль внутриклеточного уровня  $\text{Ca}^{2+}$ , фосфорилирования миози-

на и его взаимодействия с актином [13, 14].

Баланс протеинкиназ, фосфорилирующих миозин, и единственной дефосфорилирующей его фосфатазы определяет активность миозина в клетке. Механизмы такой регуляции были недавно описаны [14], но надо отметить две их особенности. Во-первых, основные воздействия направлены на изменение активности фосфатазы миозина. Считается, что ее снижение связано с развитием гипертонии и вазоспазмов. Во-вторых, те протеинкиназы, которые фосфорилируют миозин в клетке помимо КЛЦМ, —  $Ca^{2+}$ -независимые. Повышение их активности при гормональной стимуляции усиливает сокращение и тонус гладких мышц, не меняя внутриклеточный уровень  $Ca^{2+}$ . Такой механизм рабо-

тает в гладких мышцах артериальных сосудов, а в мышцах полых органов или венозных сосудов присутствует белок телокин, связывающий миозин и мешающий его фосфорилированию  $Ca^{2+}$ -независимыми протеинкиназами [14].

Фосфорилирование кальдесмона в гладких мышцах имеет тот же функциональный эффект, что и фосфорилирование тропонина-I в миокарде. Оно нарушает взаимодействие кальдесмона с актином и включает тонкую нить, облегчая связывание миозина с актином. В целом роль этого механизма невелика, так как актиновый тип регуляции сокращения гладких мышц имеет второстепенный характер. Считается, что он реализуется в некоторых тканях, например при сокращениях матки, а его нарушение повышает ве-

роятность преждевременных родов [13].

В заключение надо отметить, что именно миозиновый мотор мышц служит прототипом большинства моторов клетки, функционирование которых основано на общих принципах. Достигнутое к настоящему времени понимание механизма его работы открывает новые перспективы для применения наномоторов в различных технологических сферах. Такие попытки уже предпринимаются [15]. Не менее важно и знание физиологических механизмов регуляции активности таких моторов. Оно способствует развитию новой фармакологической терапии сердечно-сосудистых нарушений с использованием высокоселективных препаратов внутриклеточного действия. ■

## Литература

1. *Ширинский В.П., Воронников А.В.* Клеточная подвижность в сердечно-сосудистой системе // Природа. 2005. №12. С.39—44.
2. *Oda T., Iwasa M., Aihara T., Maéda Y. et al.* // Nature. 2009. V.457 P.441—445.
3. *Geeves M.A., Holmes K.C.* // Adv. Prot. Chem. 2005. V.71. P.161—193.
4. *Bersbitsky S.Y., Ferenczi M.A., Koubassova N.A., Tsaturyan A.K.* // Frontiers in Bioscience. 2009. V.14. P.3188—3213.
5. *Koubassova N.A., Bersbitsky S.Y., Ferenczi M.A., Tsaturyan A.K.* // Biophys. J. 2008. V.95. P.2880—2894.
6. *Dobbie I., Linari M., Piazzesi G., Reconditi M. et al.* // Nature. 1998. V.396. P.383—387.
7. *Bersbitsky S., Tsaturyan A., Bersbitskaya O. et al.* // Nature. 1997. V.388. P.186—190.
8. *Ferenczi M.A., Bersbitsky S.Y., Koubassova N. et al.* // Structure. 2005. V.13. P.131—141.
9. *Lehman W., Craig R.* // Adv. Exp. Med. Biol. 2008. V.644. P.95—109.
10. *Boussouf S.E., Geeves M.A.* // Adv. Exp. Med. Biol. 2007. V.592. P.99—109.
11. *Jung H.S., Komatsu S., Ikebe M., Craig R.* // Mol. Biol. Cell. 2008. V.19. P.3234—3242.
12. *Marston S., El-Mezgueldi M.* // Adv. Exp. Med. Biol. 2008. V.644. P.110—123.
13. *Kim H.R., Appel S., Vetterkind S., Gangopadhyay S.S. et al.* // J. Cell Mol. Med. 2008. V.6A. P.2165—2180.
14. *Воронников А.В., ЩербакOVA О.В., Кудряшова Т.В. и др.* // Рос. физиол. журнал им.И.М.Сеченова. 2009. V.95. P.1058—1073.
15. *Heuvel M.G.L.van den, Dekker C.* // Science. 2007. V.333. P.333—336.

# Бореальный климат в мезозое

В.А.Захаров

В рамках Международного полярного 2007–2008 года институты РАН Отделения наук о Земле получили финансовую поддержку на реализацию научной программы фундаментальных исследований «История формирования бассейна Северного Ледовитого океана и режим современных природных процессов Арктики». Одна из важнейших задач программы — исследование климатов геологического прошлого, в частности климата мезозоя, самой теплой эры в фанерозойской истории Земли. В течение 180 млн лет на нашей планете не было устойчивого ледяного покрова даже в приполярных областях. Тем не менее существовала климатическая зональность и постоянно происходили крупно- и мелкоамплитудные колебания наземного тепла и температуры вод морей и океанов. Выяснение климатических процессов представляет не только фундаментальный научный интерес, но служит ключом для прогноза поисков месторождений каустобиолитов.

## Климат в мезозое

Мезозой охватывает три периода истории Земли: триасовый (250–190 млн лет), юрский (190–145 млн лет) и меловой (145–65 млн лет). В соответствии с существующими представлениями геологов, в течение по-



**Виктор Александрович Захаров**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий отделом стратиграфии Геологического института РАН. Специалист в области палеонтологии, стратиграфии, палеоклиматологии и палеогеографии бореального мезозоя. Заслуженный деятель науки РФ.

следних 1.1 млрд лет на Земле трижды чередовались два климатических экстремума: теплый и холодный (циклы Вильсона, рис.1). В более продолжительные теплые периоды органический мир морей и континентов характеризовался большим разнообразием растений и животных и преобладанием карбонатных осадков и эвапоритов (обогащенных солями осадочных пород). Холодные периоды, сопровождавшиеся покровными оледенениями на полюсах, отличались резким сокращением таксономического разнообразия, прежде всего в низких и умеренных широтах, и преимущественно терригенными и гляциальными осадками. На протяжении каждого цикла отмечается повторяемость (периодичность) основных геологических событий.

Указанную цикличность связывают с ростом и распадом суперконтинента Пангеи, возникшей в периоды соединения разрозненных континентов в единый материк. Тогда плейт-тектоническая активность существенно снижалась и углекислый газ не поступал в атмосферу, что способствовало возникновению холодного (ледникового) климата. Пангея изолировала тепло мантии, что приводило к усилению конвекции магмы и, как следствие, к разрушению суперконтинента на отдельные континенты меньшего размера.

В местах раскола суперплиты образовывались океанские рифты, континенты раздвигались и океанские плиты субдуцировались (пододвигались) под континентальные. Этот процесс сопровождался выбросом диоксида углерода в атмосферу, что приводило к потеплению (парниковый эффект).

Спустя многие миллионы лет континентальные плиты снова собирались в следующую Пангею, и весь цикл повторялся. Полный цикл занимает 400 млн лет. С позднего протерозоя выделяются три



Рис.1. Ледниковые и межледниковые циклы и этапы (циклы Вильсона). Стрелкой показан малый ледниковый период, который располагается в конце каждого межледниковья (Дж. Селба, 1991).

цикла. Каждый состоял из пяти стадий: аккумуляции тепла под Пангеей, сопровождавшейся термальным подъемом континента, который фиксировался стратиграфическим перерывом; утонения коры, обусловленного формированием бассейнов или впадин с вулканическими рифтами; последующего утонения коры, ведущего к рифтингу; быстрого спрединга морского дна и, наконец, медленного спрединга, субдукции и закрытия океанических рифтов с образованием другой Пангеи.

Мезозойская эра попадает в третью, четвертую и начало пятой стадии третьего (последнего) глобального цикла.

Мезозой — время парникового (greenhouse) климата. Тепло в то время довольно равномерно распределялось по Земле, тем не менее в Северном полушарии в течение всего мезозоя существовала климатическая зональность (рис.2). В приэкваториальной части находился тропический климатический пояс (биогеографическая надобласть Тетис—Панталасса) со среднегодовыми температурами 25—30°С. Ближе к северу, примерно, до 45—50°с.ш. располагался субтропический пояс (Перитетис), а севернее размещался умеренно-теплый бореальный климатический пояс (Панбореальная биогеографическая надобласть). В приполярных областях преобладал климат умеренный до прохладного. Однако никаких ледовых покровов не существовало. Об этом свидетельствуют данные биогеографии и седиментологии. В высоких палеоширотах помимо свойственных умеренным климатическим зонам животных и растений обитали отдельные, характерные для субтропических и даже тропических областей, виды. Например, в осадках раннетриасовых морей на севере Сибири найдены тропические растения *Pleuromeia*, а на протяжении всего мезозоя в морях на территории севера Евразии, примыкавшей к северному географическому палеополюсу, совместно с бореальными (умеренно теплолюбивыми) периодически обитали субтетиические (субтропические) и тетиические (тропические) моллюски — аммониты и двустворчатые [1].

### Флуктуации климата

Цикличность природных явлений используется для предсказаний событий будущего. Инструментальные данные о колебаниях температуры и осадков последних 150 лет в средних широтах Северного полушария позволяют прогнозировать возможные изменения этих важнейших погодных факторов на ближнюю перспективу. Более отдаленный прогноз основан на знании о флуктуациях климата в геологическом прошлом. Он, как правило, базируется на реконструкции палеоклиматов последних тысяч или десятков тысяч лет истории Земли. Существует ли потребность для человечества, помимо врожденного любопытства, воссоз-

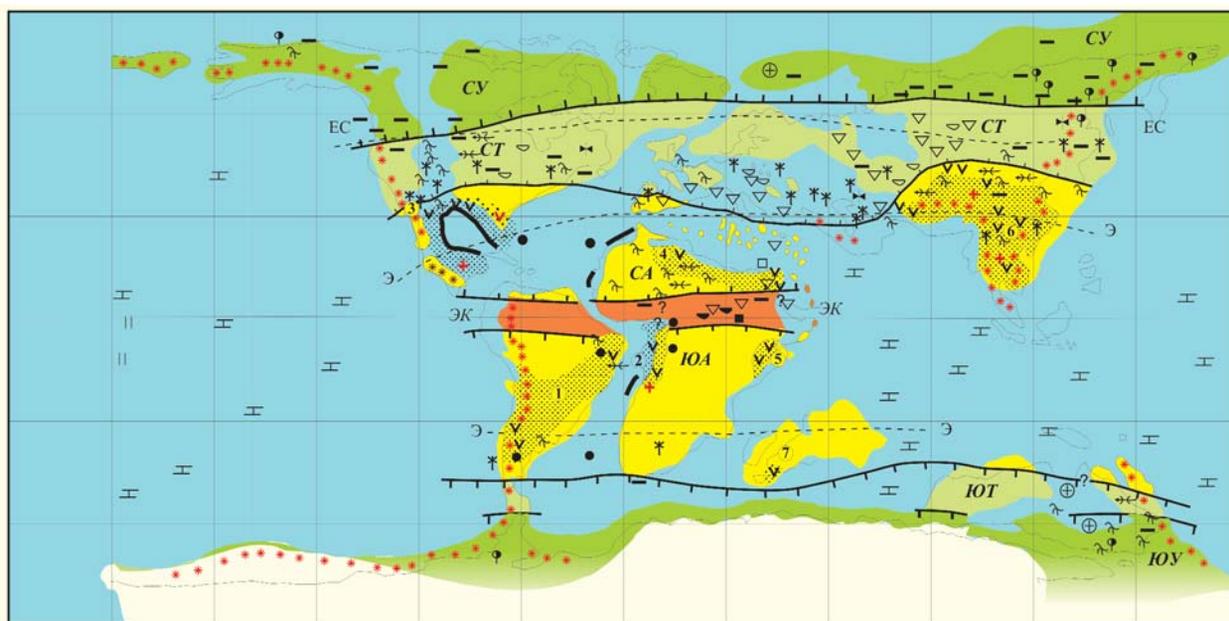


Рис.2. Климатические пояса в альбском веке раннего мела (Н.М. Чумаков, 2004). Зеленым цветом обозначены умеренные пояса. СУ— северный умеренный, или бореальный.

давать климаты более далекого геологического прошлого? История климата — это часть истории Земли, познание которой (как и истории человечества) — один из признаков цивилизованного общества. Однако необходимость изучения палеоклимата в эпоху острой потребности в ископаемом энергетическом сырье прямо связана и с экономической деятельностью человека. Дело в том, что концентрация углеводородов в земных недрах определяется биологической продуктивностью тех морских и пресноводных бассейнов, в которых обитали организмы, послужившие исходным органическим материалом, захороненным и впоследствии преобразованным в газ, нефть, уголь и горючие сланцы. Показатель биологической продуктивности (вес органического вещества, продуцируемого в единицу времени на единицу площади), как в геологическом прошлом, так и ныне в значительной степени зависит и зависит от условий обитания организмов, которые определяются прежде всего климатом. Так что заключение о перспективности тех или иных пород на поиски каустобиолитов основывается и на знаниях о палеоклиматах времени, в течение которого формировались осадочные толщи.

Наблюдения за изменением географических ареалов бореальных и тетических морских моллюсков во времени показали, что в течение мезозоя некоторые из них перемещались. Чаще всего отмечаются проникновения отдельных тетических или субтетических таксонов на север, а бореальных — на юг, но иногда интервенция носила массовый характер [1, 2]. «Глубина» проникнове-

ния теплолюбивых моллюсков по широте также различалась: от 5—7 до 20°. Совместный анализ временных интервалов миграций (перемещений в пространстве) моллюсков и колебаний уровня моря (трансгрессивно-регрессивные кривые) показал совпадение в большинстве случаев моментов миграций и, вероятно, эвстатических (глобальных) подъемов уровня. В других случаях расширение ареалов моллюсков довольно резонно объясняется физико-палеогеографическими перестройками [3]. Как правило, имеются и седиментологические свидетельства изменения факторов среды, вызванного перемещением водных масс. Проникновение некоторых субтетических родов беспозвоночных в позднем оксфорде (юрский период) на север Тимано-Печорской области, в позднем кимеридже (юрский период) — на Приполярный Урал, в начале позднего валанжина (начало мелового периода) — на широту Баренцева моря и в раннем маастрихте (конец мелового периода) — до Широкого Приобья (Западная Сибирь) сопровождается повышением карбонатности пород, в которых обнаружены их окаменелости. Отсутствие окаменелостей теплолюбивых моллюсков в осадках совпадает и с минералогическими свидетельствами невысокой температуры вод — находкой специфических образований (беломорской рогоульки, или генойш), в состав которых входят тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) и кальцит с арагонитом ( $\text{CaCO}_3$ ). Например, таксономически бедные слои с избытком тенардита отмечаются на севере Сибири в позднем плинсбахе, в аалене, байосе, раннем бате, раннем келловее (юрский



Рис.3. Генойша, или ископаемая «беломорская рогулька», из верхнего аалена Анабарского залива, север Восточной Сибири.

период) и в самом раннем готериве (ранний мел). В наше время беломорская рогулька (рис.3) образуется в илах на дне северных морей: Белого, Баренцева, Гренландского, Норвежского (включая фьорды) при температуре, близкой к 0°C.

Совместный анализ данных о таксономическом разнообразии мезозойских беспозвоночных в средних и высоких широтах, о бореально-тетических перемещениях моллюсков в направлении юг—север и север—юг, о местоположении биогеографического бореально-тетического экотона, об изменении площади карбонатной седиментации, о местонахождениях агрегатов тенардита позволил наметить тренды тепла—холода в течение мезозоя в Панбореальной надобласти на территории северной Евразии [4]. Установлено всего 22 разнонаправленных тренда — 11 пар (рис.4). Следует отметить, что кривая на графике показывает лишь тенденции потепления—похолодания, а не абсолютные значения палеотемпературы.

На фоне выделенных крупных флуктуаций тепла происходили кратковременные, но иногда значительные колебания палеотемпературы. Так, в период биотической перестройки на границе плинсбаха и тоара (юрский период) фиксируется существенное потепление в самом конце плинсбаха, а затем довольно резкое падение палеотемпературы (по данным некоторых авторов, на 5—6°C) в самом начале тоара [5]. Если связывать кратковременные проникновения (перемещения) отдельных теплолюбивых таксонов морских моллюсков на север (до арктических широт), а холоднолюбивых — на юг (до прежних субтропиков) с колебаниями температуры морских вод, то следует допустить, что микрофлуктуации климата происходили



Рис.4. Кривая флуктуаций тепла в мезозое Арктики (север Сибири). Треугольниками показаны уровни перестроек (преобразований) биоты. Значки справа — интервалы местонахождения генойш в разрезах мезозоя. На этих же интервалах сокращается таксономическое разнообразие биоты.

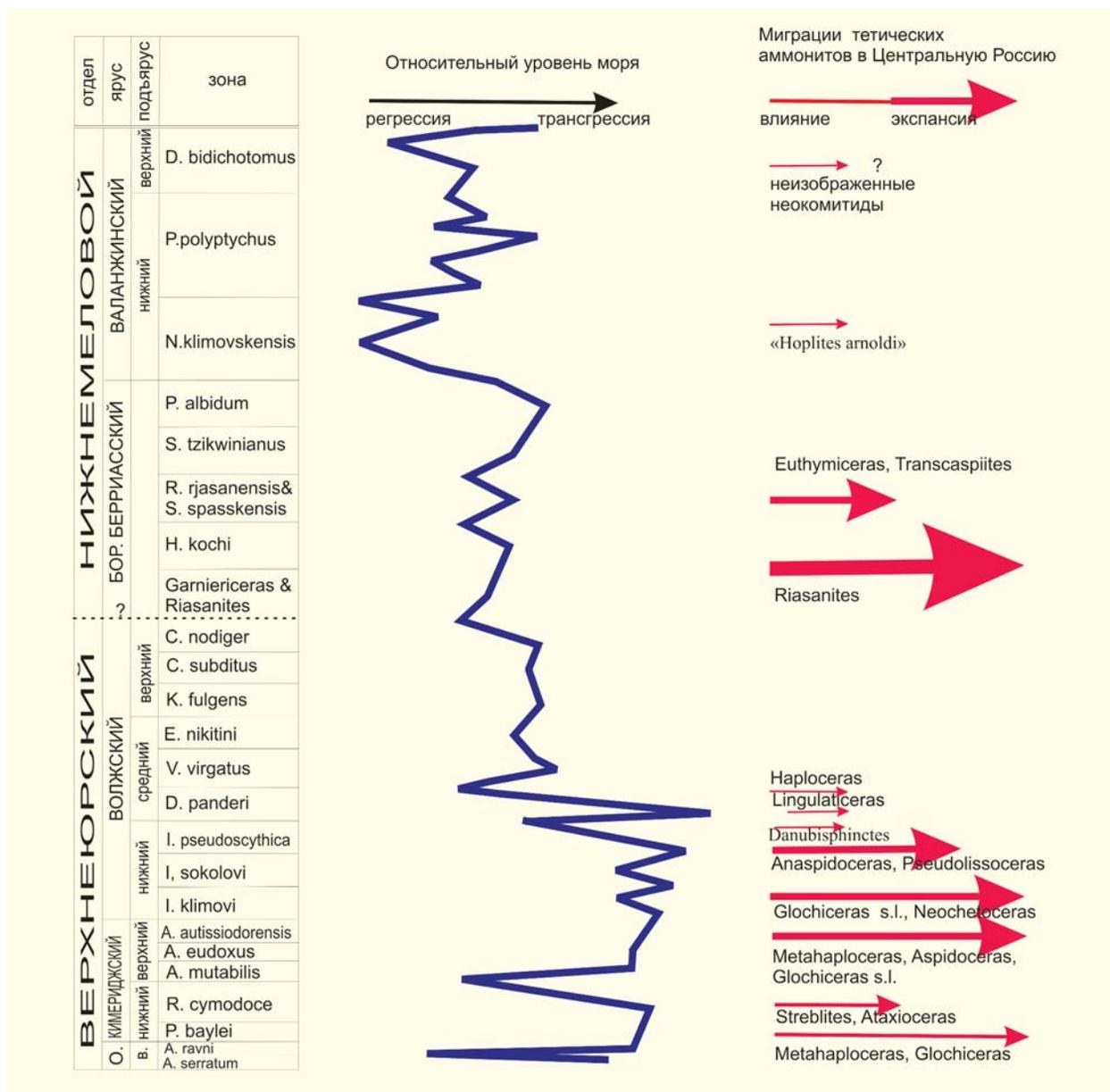


Рис.5. Связь колебаний уровня моря (трангрессивно-регрессивных событий) и иммиграций с юга на север теплолюбивых аммонитов (вымершие головоногие моллюски) в позднеюрском и раннемеловом Среднерусском море [2].

довольно часто (рис.5). Возможно, число их в теплом мезозое сравнимо с числом в последние сотни тысяч лет четвертичного периода. Справедливость этого предположения предстоит еще выявить.

### Климатические признаки вымираний таксонов

Климатические причины привлекаются для объяснения глобальных массовых вымираний на границах ордовика и силура (событие хирнантий — вымирание крупных групп морских беспозвоночных), в позднем девоне — на границе франа-фамена (событие кельвассер — вымирание морских беспозвоночных), на границах перми и триаса, триаса и юры, мела и палеогена, эоцена и олигоцена, плейстоцена и голоцена. Считается, что во всех этих биотических перестройках существенная роль принадлежала относительно кратковременному изменению температуры в средних широтах. Вероятно, изменения тепла были не однонаправленными, а циклическими. Возможно, на фоне похолодания перед вымиранием амплитуда колебаний тепла была довольно значительной. На примере бореального мезозоя такой сценарий

звоночных), в позднем девоне — на границе франа-фамена (событие кельвассер — вымирание морских беспозвоночных), на границах перми и триаса, триаса и юры, мела и палеогена, эоцена и олигоцена, плейстоцена и голоцена. Считается, что во всех этих биотических перестройках существенная роль принадлежала относительно кратковременному изменению температуры в средних широтах. Вероятно, изменения тепла были не однонаправленными, а циклическими. Возможно, на фоне похолодания перед вымиранием амплитуда колебаний тепла была довольно значительной. На примере бореального мезозоя такой сценарий

можно предположить для биотических перестроек в пограничном интервале татарского (пермь) и индского веков, карнийского и ладинского (триас), плинсбахского и тоарского, кимериджского и волжского (юра), готеривского и барремского, маастрихтского и датского (мел), эоцена и олигоцена (палеоген). Как показали детальнейшие исследования пограничного интервала маастрихт—даний в Австрии, кратковременный интервал (возможно, часть биозоны *Globigerina eugubina* — глобально прослеживаемый хроностратиграфический уровень) был насыщен довольно разноплановыми биотическими событиями, вызванными колебаниями факторов среды [6]. Есть все основания считать, что кратковременные низко- и среднеамплитудные колебания тепла, по крайней мере в средних и высоких широтах, были связаны с 26-, 40- и 100-тысячелетними астрономическими циклами, названными по имени открывшего их сербского исследователя Миланковича.

Исследователи признают, что вымиранию таксона предшествовало сокращение ареала его обитания. При этом называются разные причины, ответственные за уменьшение площади обитания таксона. Многие биологи склонны видеть их в деградации гено типа. Палеонтологи, не считая сторонников сальтационной (катастрофической) гипотезы, часто объясняют сокращение ареала таксонов палеогеографическими перестройками. Совершенно очевидно, что сокращение ареалов распространения некоторых обреченных на вымирание морских мезозойских беспозвоночных начинается с высоких широт. Так, последние конодонты (очень мелкие древние полухордовые)

в Тетисе (тропиках) вымирали в самом конце триаса (в рэте), а в Арктике они исчезли из разрезов значительно раньше — уже в нории [7]. Наиболее поздние иноцерамы (моллюски) найдены на территории Арктики в основании кампанского яруса, т.е. примерно за 5 млн лет до конца мезозойской эры [8], а последние обнаружены в Испании на границе мезозоя и кайнозоя.

\* \* \*

Когда мы утверждаем, что климат — один из главных факторов, влиявших и влияющих на преобразование лика Земли (включая биосферу и стратиферу), не следует забывать, что основным источником тепла служит Солнце. Количество тепла, получаемого Землей от Солнца, мало изменялось в течение геологического времени. В то же время, как показывают палеоклиматические реконструкции, на Земле чередовались состояния теплой и холодной биосфер. Стало быть, уже существовали силы, управлявшие распределением тепла. С этого момента — момента интерпретации — геологи переходят в мир гипотез. Одна из них — тектоника литосферных плит. Однако она не в состоянии объяснить многое, в частности скорости, с которыми, как мы убеждаемся, происходят климатические изменения. Скоротечность процессов можно объяснить с помощью астрономических циклов. Но как с планетарными явлениями связаны глобальные события? Остается еще много нерешенных вопросов, ответ на которые предстоит искать будущим поколениям геологов, геофизиков, палеонтологов и других специалистов по наукам о Земле. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-05-64949) и программы ОН314 РАН.**

## Литература

1. Захаров В.А., Рогов М.А. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2003. Т.11. №2. С.54—74.
2. Rogov M.A., Zakharov V.A., Kiselev D.N. // *Volumina Jurassica*. 2009. V.1. P.143—152.
3. Zakharov V.A., Rogov M.A. // *Revista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*. 2004. V.110. №1. P.339—344.
4. Захаров В.А. Климат Северо-Восточной Азии в мезозое (обзор): Сборник памяти Всеволода Андреевича Вахромеева / Отв. ред. М.А.Ахметьев. М., 2002. С.262—269.
5. Захаров В.А., Шурыгин Б.Н., Ильина В.И., Никитенко Б.Л. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т.14. №4. С.61—80.
6. Grachev A.J., Korcbagin O.A., Kollmann H.A. et al. // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005. V.7. №6. P.1—45.
7. Клец Т.В. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2008. Т.16. №5. С.15—36.
8. Хоментовский О.В., Захаров В.А., Лебедева Н.К., Воробьева О.И. // Геология и геофизика. 1999. Т.40. №4. С.512—529.

# На поиски меловых палеопочв, или По следам игуанодона

С.В.Наугольных,  
доктор геолого-минералогических наук  
Геологический институт РАН  
Москва

Восьмого марта 1996 г. в газете «Таймс» появилось необычное и большое, в пол-полосы, сообщение о предстоящей перемене в британском Музее естественной истории. В заметке говорилось, что английский палеонтолог Д.Норманн планирует изменить постановку скелета игуанодона, находящегося в экспозиции. Намерение палеонтолога связано с тем, что, по его мнению, этот динозавр передвигался не на двух задних конечностях, как считалось ранее, а на всех четырех, опираясь и на передние конечности тоже. Хвост животного при этом был приподнят, а не волочился по земле. Сообщение сопровождалось эффектной фотографией с портретом самого Норманна на фоне скелета игуанодона, смонтированного пока еще в традиционной позе.

Эту статью я аккуратно вырезал и вклеил в специальный альбом для разных интересных заметок на палеонтологическую тематику, которые публиковались в периодической печати. Газетная статья хранилась у меня несколько лет, пока к вопросу о походке и «осанке» игуанодона я сам не пришел совершенно необычным и неожиданным образом.

В последние годы мы вместе с коллегами-палеопочвоведомы систематически собирали данные о древних, ископаемых почвах, которые встречаются в палеозойских и мезозойских отложениях европейской России.

Нужно это для того, чтобы составить общий каталог палеозойско-мезозойских палеопочв и указать их основные типы и эталонные профили. Изучение палеопочв дает массу интереснейшей информации не только о климате и ландшафтах прошлых геологических эпох. Иногда удается найти в погребенной почве ископаемые корни вышших растений, следы обитания почвенных организмов и копролиты. Тогда можно составить представления о флоре и фауне того времени, когда палеопочвенный профиль образовался.

Изучение палеопочв требует кропотливой и неспешной работы. Прежде всего надо составить полное непредвзятое описание профиля, выделить генетические почвенные горизонты и произвести нужные измерения. Необходимо также сфотографировать и отрисовать со всеми подробностями саму палеопочву, перекрывающие ее и нижележащие слои и, конечно же, взять образцы для геохимических анализов. Но сначала надо палеопочву отыскать.

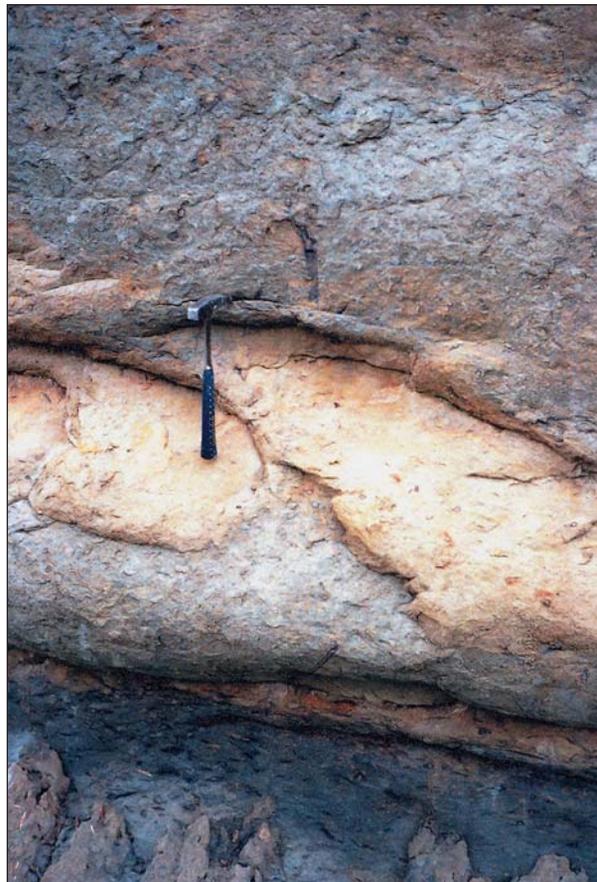
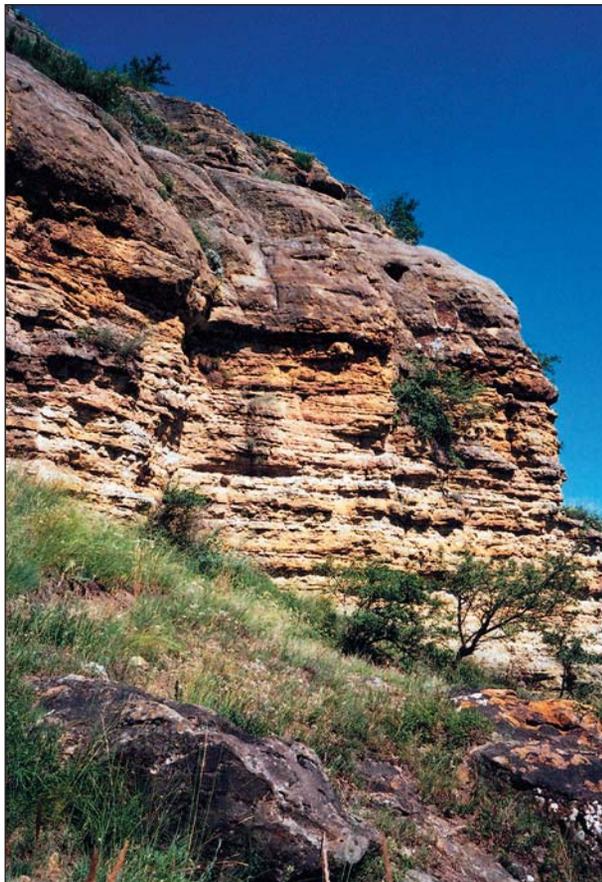
К настоящему времени палеопочвы и почвоподобные образования обнаружены в ордовикских (!), девонских, каменноугольных, пермских и триасовых отложениях европейской части России. Но вот данных о меловых палеопочвах не было никаких. Некоторые палеопочвы упомянутых времен сейчас уже изучены со всей возможной детальностью. Совсем недавно найден хорошо развитый палеопочвенный профиль средне-

юрского возраста на верхнекаменноугольных известняках у д.Русавкино в Московской обл. Получить сведения о меловых палеопочвах было бы очень полезно: их стратиграфическая последовательность от палеозоя до мезозоя включительно тогда стала бы практически полной.

Меловые отложения в пределах европейской России почти повсеместно морские. Понятно, что искать палеопочвы в толщах морского происхождения — дело бесперспективное. Однако к югу от Русской платформы, в отрогах Северного Кавказа, такие палеопочвы вполне могли бы присутствовать. Здесь к концу мезозоя уже началось обмеление южной части краевого прогиба, примыкавшего к нарождающимся Кавказским горам.

Мне неоднократно приходилось бывать на Северном Кавказе. Для геолога Кавказ — настоящая земля обетованная. Прекрасная обнаженность позволяет проследить наиболее интересный слой на протяжении многих километров. Вместе с хорошей изученностью геологического строения региона это создает просто уникальную возможность для разного рода тафономических и палеоэкологических исследований. Но Северный Кавказ большой. С какого района надо начать?

В своем альбоме с газетными и журнальными вырезками я нашел несколько заметок, опубликованных в середине 80-х годов в ставропольских газетах. В них сообщалось о следах динозавров, обнаруженных в районе



Нижнемеловые отложения в окрестностях Кисловодска (слева) и джинальский палеопочвенный профиль с предполагаемыми остатками корней. Найдены они в сером слое под ожелезненным оранжевым прослоем (справа внизу) и в толще песчаника (справа сверху).

Кисловодска! Однако, к сожалению, фотографии следов опубликованы не были. Поговорив со знакомыми специалистами по ископаемым рептилиям, я узнал, что палеонтологи об этих следах слышали, но на местонахождение никто так и не собрался съездить.

Сообщения о кисловодских следах натолкнули меня на здравую мысль. Если здесь периодически осушалась прибрежная часть мелководного морского бассейна и по его берегам бродили динозавры, то могли найтись и признаки палеопочв. Я собрался в дорогу.

Люди, бывавшие в Кисловодске и путешествовавшие по его окрестностям, наверняка запомнили живописные круглые обрывы окрестных гор. Обнажающиеся по южным и юго-запад-

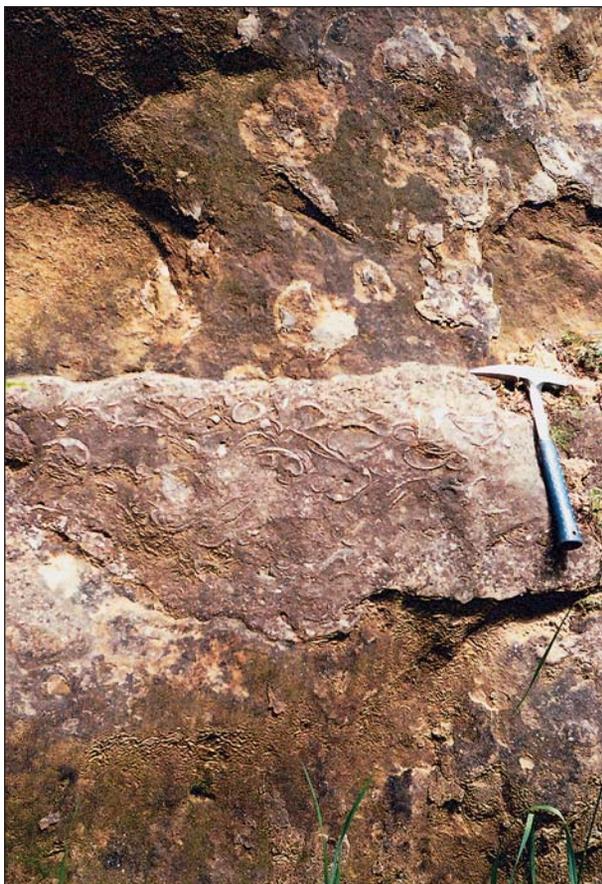
ным склонам Джинальского и Боргустанского хребтов отложения мелового возраста представляют собой своего рода гигантскую каменную книгу. «Листы» ее широко раскрыты и повествуют о жизни Земли и ее обитателей на закате мезозойской эры. В этих отложениях встречаются прослойки с многочисленными остатками морских организмов, по которым можно точно определить возраст вмещающих пород.

Уже в ходе первых полевых экскурсий мои ожидания подтвердились. В верхнемеловых отложениях, бывших безусловно морскими, содержались окаменелые остатки бентосных организмов — двустворчатых моллюсков иноцерамов и морских ежей. Эти животные были обитателями мелководья. В тех же

слоях присутствовали так называемые поверхности твердого дна, или, как их называют геологи, «хардграунды», со следами зарывания разных донных беспозвоночных. Остатки nektonных организмов — обитателей водной толщи открытого моря — полностью отсутствовали.

Искать палеопочвы следовало в более древних, нижнемеловых отложениях. Именно там, кстати, и были обнаружены следы динозавров.

Нижнемеловые отложения в окрестностях Кисловодска — это в основном песчаники. Детальное изучение разреза привело, наконец, к положительным результатам. Особенно интересные в отношении палеопочв обнажения нашлись на склоне Джинальского хребта. Это практически в пригороде



Песчаник, подстилаемый темпеститом с многочисленными раковинами двустворчатых моллюсков (внизу).



Остаток корня высшего растения (предположительно, голосеменного). Именно в этом корне частично сохранилась анатомическая структура.

Кисловодска, в пределах знаменитого Кисловодского парка.

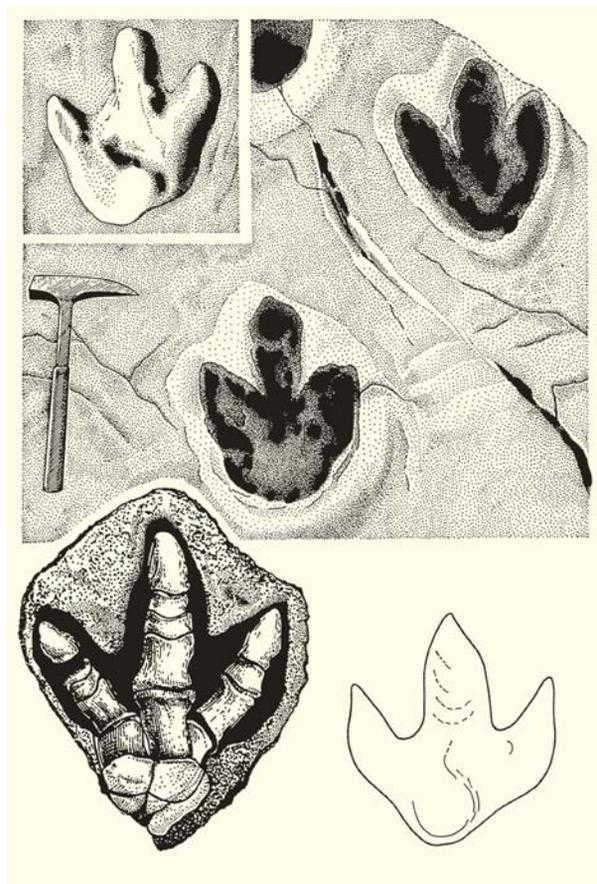
Нижняя часть мощной толщи обнажающихся здесь неяснослоистых песчаников будто зажата между двумя слоями с многочисленными остатками морских организмов. В основании этой толщи песчаников я обнаружил загадочные трубочки, ориентированные то вертикально, то наклонно и пронизывающие нижние 50–60 см слоя. Трубочки были темноокрашенными, почти черными (по всей видимости, когда-то полыми), а их центральную часть заполнял осадок. Некоторые из них оказались «одетыми» в ожелезненную — лимонитовую\* — «рубашку».

\* Лимонит — собирательное название природных минеральных агрегатов, смесей гидроксидов Fe<sup>+3</sup>.

Сначала мне показалось, что это следы ползания илоедов. Такие следы периодически встречались в вышележащих верхнемеловых отложениях. Однако при внимательном изучении трубочек выяснилось, что это не так. Во-первых, трубочки были разного диаметра — от немногих миллиметров до 4 см — и иногда дважды или трижды ветвились. Правда, доминировали все-таки трубочки простые, неветвящиеся. Во-вторых, диаметр всех трубочек постепенно уменьшался книзу. Ничего подобного у норок роющих морских беспозвоночных быть, разумеется, не могло. И, наконец, в-третьих, в одном из нижележащих слоев песчаника мне попалась трубочка, внутри которой прекрасно сохранились проводящие ткани! Это со всей опре-

деленностью указывало на то, что трубочка когда-то была корешком высшего растения. Сохранились эти трубочки-корни именно в том самом месте, где материнские растения произрастали, т.е., как говорят палеонтологи, *in situ*. Иными словами, на поверхности пляжа древнего моря появилась так называемая маршевая растительность, а значит, был сделан первый шаг к началу почвообразования.

Дополнительно изучив корни, я обнаружил, что некоторые из них разделены на узлы и междоузлия — характерный признак корней и побегов современных и ископаемых хвощевидных. Видимо, и корни нижнемеловой палеопочвы или, по меньшей мере, некоторые из них, принадлежали хвощевидным, но значительно более крупным по срав-



Плита из окрестностей Кисловодска, на которой видны следы игуанодона. Справа — прорисовка плиты со следами игуанодона. Для сравнения приведены близкие по морфологии следы из нижнемеловых отложений Германии (на врезке; с.Обернкиршен, расположенное недалеко от Бюкенбурга; рисунок сделан по фотографии [6]), и Англии (справа внизу; [2]). Слева внизу показано соотношение следа со строением стопы игуанодона [2].

нению с большинством современных хвощей.

Песчаник с остатками корневых местами приобрел темно-серый оттенок за счет большого количества органического материала. На некоторых участках попадались лимонитовые прослои и карбонатные включения (педонодули), которые напоминали образующиеся в болотах почвенные конкреции бурого железняка.

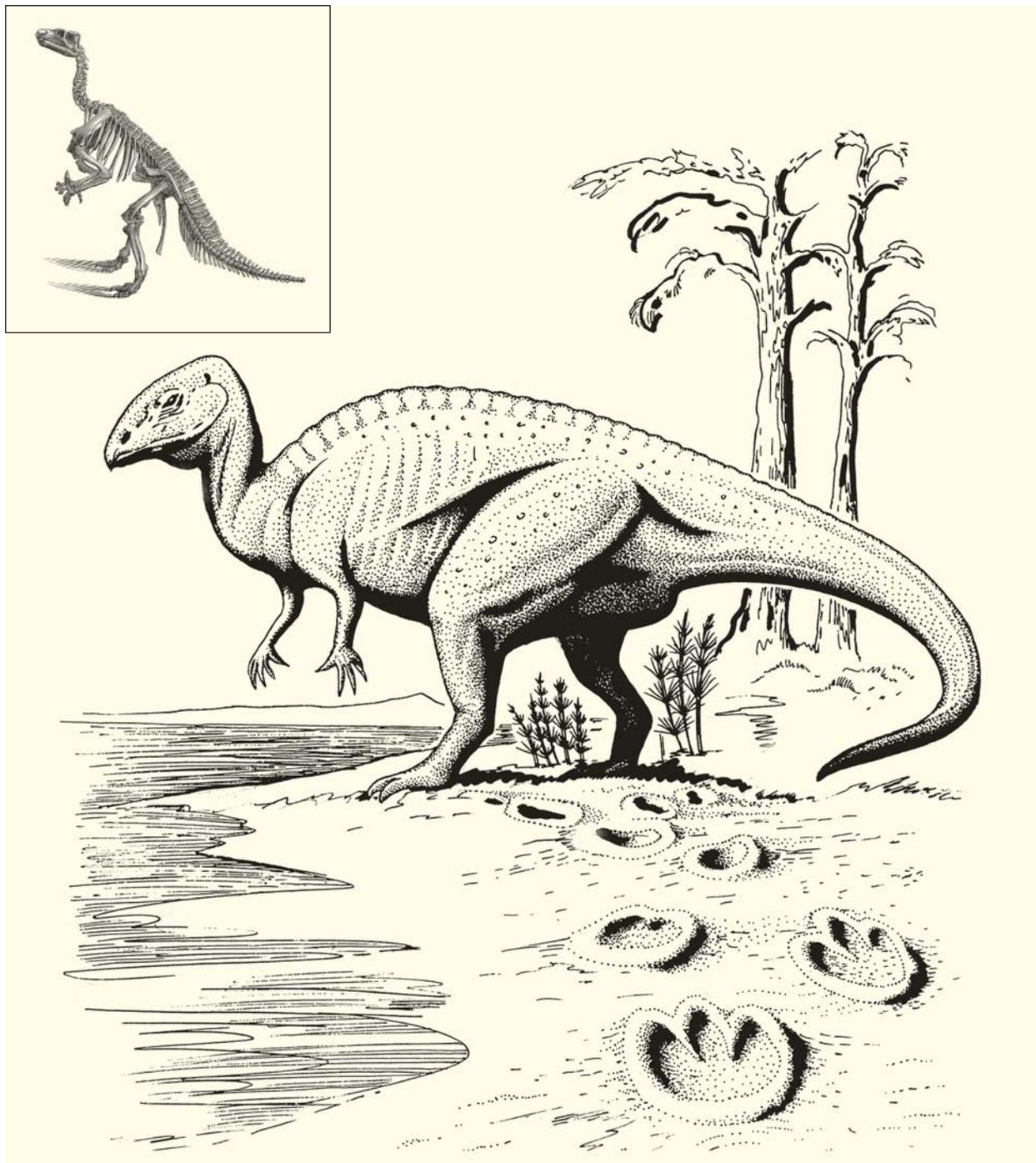
Вернемся к прослоям с морской фауной, расположенным под и над предполагаемым палеопочвенным профилем, содержащим корни-трубочки. Здесь было огромное количество остатков морских беспозвоночных, в том числе и раковины головоногих моллюсков аммонитов. Именно по ним удалось точ-

но определить возраст палеопочвы, «зажатой» между слоями с морской фауной. Стратиграфически он соответствует аптскому ярусу нижнего отдела меловой системы, а геохронологически — аптскому веку раннемеловой эпохи мелового периода.

Остатки раковин морских беспозвоночных в обоих слоях образовывали массовые скопления. Особенно много здесь было раковин двустворчатых моллюсков разного возраста с плотно сомкнутыми створками. Какая-либо сортировка органических остатков в слоях отсутствовала. Мощность каждого слоя с морской фауной составляла около полуметра. Вместе с раковинами морских беспозвоночных встречалась хорошо сохранившаяся древесина хвойных. На фрагмен-

тах окаменелых стволов имелись сучки от обломившихся ветвей, а вторичная ксилема была мощной. Наличие древесины свидетельствовало о близости суши, вероятно, плотно населенной.

Я склонен интерпретировать прослой с морской фауной этого разреза как штормовые отложения. Образовались они на верхней сублиторали и на литорали мелководного нормально-морского бассейна после кратковременных, но очень сильных штормов. За время между двумя мощными штормами на широком литоральном участке накопился песок и развилась наземная околородная растительность. Она состояла преимущественно из крупных хвощей, достигавших метра-полтора в высоту. Более возвышенные участ-



Реконструкция раннемелового ландшафта окрестностей Кисловодска. Игуанодон передвигается только на задних конечностях, не опираясь на передние и не волоча хвост по земле. На врезке скелет игуанодона, смонтированный в традиционной позе [2].

ки суши, возможно, отстоящие на несколько километров от места накопления песков, где начал закладываться палеопочвенный профиль, заняла мезо- или даже ксерофильная растительность с хвойными.

Таким образом, кое-что о меловых палеопочвах окрестностей Кисловодска удалось выяснить. Пора было приниматься за следы динозавра.

Плита со следовой дорожкой по счастливому для российской

палеонтологии стечению обстоятельств оказалась на охраняемой территории Лермонтовского нарзанного источника в долине р.Ольховки. Получить разрешение на его посещение мне помог директор Кисловодского

краеведческого музея С.С.Лузин, которому я искренне признателен. Кстати сказать, в самом музее есть небольшая, но очень симпатичная палеонтологическая экспозиция.

По договоренности с сотрудниками Кисловодского водоканала была организована поездка на местонахождение динозавровых следов. Мы отправились туда втроем — главный технолог Кисловодского водоканала В.Н.Священко, водитель Р.Е.Беломосов и я.

Благодаря заботе сотрудников водоканала над уникальной плитой со следами был сооружен навес, частично предохраняющий эти отпечатки от атмосферных осадков. На плите отчетливо сохранились три следа, два из них видны прекрасно, а третий, к сожалению, менее отчетлив. Следы трехпалые (их длина в среднем составляет 40 см при ширине 34–35 см), с нечетким ячеистым рельефом в пяточной области. Вокруг них поверхность субстрата приподнята, а сами следы будто вдавлены нажатием ступни динозавра на когда-то влажный осадок. Высота приподнятой бровки составляет 4 см, а глубина следов — 6 см, что косвенно свидетельствует о массе и размере древнего ящера.

Сходные следы известны из верхнеюрских и нижнемеловых отложений многих районов ми-

ра. Например, на знаменитом плато Ходжа-и-пиль-Ата (Туркмения) многочисленны следовые дорожки, оставленные целым стадом динозавров [1]. В нижнемеловых отложениях Англии еще в XIX в. были обнаружены следы, практически идентичные кисловодским и принадлежавшие игуанодону [2]. Именно они послужили основой для реконструкции его «бипедальности», т.е. хождения на двух ногах, а отсюда и традиционной постановки скелета, широко использованной в палеонтологии позвоночных [см., например, 3–5]. Насколько мне известно, кисловодская плита — единственное местонахождение следов динозавров в России. Знаменитые отпечатки динозавровых следов в Туркмении, Таджикистане и Грузии, интенсивно изучавшиеся советскими палеонтологами, сейчас оказались за границей.

Судя по заметке в «Таймс», Норманн предлагает поставить игуанодона на четыре лапы, сделать его «квадрипедальным». Во многих музеях мира, в научных и научно-популярных изданиях и даже в кинофильмах о динозаврах эта новая гипотеза уже нашла свое отражение. Но согласуется ли она с фактами, в частности со следовыми дорожками, оставленными игуанодонами и их ближайшими родственниками?

Я внимательно изучил все доступные мне источники с описаниями и изображениями игуанодоновых следов, однако ни в одном источнике не нашел совместных отпечатков ступней задних и передних конечностей [6]. Выходит, Норманн ошибался. Но не было и следов от волочащегося хвоста, который так любили рисовать на старых реконструкциях. На кисловодских следах тоже нет никаких намеков на то, что хвост игуанодона тащился по земле, правда, нет и признаков опоры на передние лапы.

Все это вместе с данными о джинальской палеопочве привело меня к мысли предложить свою реконструкцию игуанодона и ландшафта, в котором тот обитал. Обобщенный раннемеловой ландшафт, существовавший на месте Кисловодска в середине мелового периода мезозойской эры, около 100 млн лет назад, представляется таким. На литорали с песчаным пляжем растут хвощи (от них остались корни в пластах песчаников Джинальского хребта), а дальше — хвойные. (Кстати, их древесина нередко встречается в нижнемеловых отложениях окрестностей Кисловодска.) По литорали и идет игуанодон, наклонившись вперед и приподняв над землей хвост. В мягком иле остаются следы, о которых через 100 млн лет будут спорить палеонтологи. ■

## Литература

1. Аманниязов К.Н. // Проблемы освоения пустынь. 1985. №2. С.23–29.
2. Dollo L. // Bull. Sci. France et Belgique. 1906. Т.40 (5<sup>e</sup> série. V.4). P.1–12.
3. Рождественский А.К. Надотряд Dinosauria. Динозавры // Основы палеонтологии. Земноводные, пресмыкающиеся, птицы. М., 1964. С.523–589.
4. Татаринцов Л.П. Как исчезли динозавры? // Природа. 1980. №4. С.31–39.
5. Татаринцов Л.П. Очерки по эволюции рептилий. Архозавры и зверообразные. М., 2009.
6. Haubold H. Die fossilen Saurierfahrten. Lutherstadt Wittenberg, 1974.

# Птица невидимка

В.И.Булавинцев,  
кандидат биологических наук  
Москва

Дикие животные — существа скрытные, и птицы не исключение, не любят к себе досужего внимания. Но есть среди них особо осторожные, просто невидимки. Голос подают часто и рядом, но увидеть их — редкая удача, мало кому посчастливится. Вот такая птица в наших местах, даже в Москве, не редкость. В народе называют ее дергачом, а зоологическое имя — коростель (*Crex crex*). По весне и в начале лета его скрипучий крик в пойменных лугах, на опушках леса, в старых парках и садах — дело обычное. А вот самой птицы не видно. Рядом кричит, в нескольких метрах, но не выдает себя коростель.

По научной классификации коростель относится к семейству пастушковых отряда журавлеобразных птиц. Этот отряд богат семействами — современными и ископаемыми. В числе пастушковых значится более 30 родов и по меньшей мере 129 видов, включая семь (или более) вымерших. В нашей стране обычны только 12 видов, из которых коростель распространен наиболее широко — от западных до восточных границ. Но будучи, как и все пастушковые, выходцем из южных частей земного шара, дергач не «идет» далеко на север, особенно в восточной части России.

Коростель — птица наземная, в обыденной жизни крыльями пользуется редко, больше бегают. Однако во время сезонных миграций совершает значительные перелеты, пересекая моря и пустынные участки суши. Сжатое с боков тело, гибкая шея и силь-



Насторожившийся самец.

Здесь и далее фото автора

ные лапы максимально облегчают передвижение птицы в густом высокотравье и куртинах кустарников. А если добавить защитную окраску оперенья — рыжевато-коричневую сверху,

оливково-серую на груди и шее, испещренную темными штрихами, — это уже существо, идеально приспособленное к обитанию на высокотравных лугах и лесных опушках.

© Булавинцев В.И., 2010



Отец будущего семейства.



Чем не динозавр!

У нас в Подмоскowie коростель появляется довольно поздно, в середине мая, а улетает на зимовку в Африку рано — в конце августа. Во время тока, в пору

формирования брачных пар, самцы принимают разные «рыцарские» позы: вытягиваются столбиком, пританцовывают, топорчат перья, пригибаясь

к земле. Но наблюдать токующих птиц мало кому удастся.

Немудреное гнездо-ямка устраивается на земле вскоре после возвращения с зимовки. Но его трудно разглядеть в густой траве или куртинах кустарников. В кладке 6—12 яиц, насиживает их самочка — недели две с половиной или чуть больше. Вылупившиеся птенцы обсыхают в гнезде и через день-два покидают его. Кормиться самостоятельно начинают в конце первой недели жизни. Через месяц-полтора молодежь уже способна летать.

Питается коростель беспозвоночными и мелкими позвоночными животными. Это обычные обитатели увлажненных мест с плодородной почвой: черви, моллюски, насекомые, лягушата, тритоны. Дополняют рацион семена растений. И если по весне или в начале лета послышится где-то в парке или за городом скрипучий, надсадный крик дергача, значит, не оскудело место это, жива природа, не совсем еще добыта человеком. ■



Бегом через дорогу.

# Дружба народов

Р.К.Расцветаева,

доктор геолого-минералогических наук

Институт кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН  
Москва

**Н**а долю силикатов (соединений кремния) приходится треть минеральных видов, из которых состоит 95% земной коры. Кроме того, силикаты обнаружены в каменных метеоритах, на Луне, в космической пыли. Они находятся в растениях и человеческом организме. В некоторых минералах наравне с кремнием в тетраэдрических постройках участвуют и другие элементы. Это алюмосиликаты, бериллосиликаты, боросиликаты и др. Есть и такие минералы, в которых присутствует одновременно несколько тетраэдрических катионов разных размеров с зарядом от +1 до +5.

## Пролог

Постройки из кремниевых тетраэдров поражают разнообразием архитектуры. Они ажурные и вместе с тем прочные. Но некоторые минералы предпочитают инкрустировать силикатные кирпичики алюминиевыми, борными, фосфорными, бериллиевыми и другими тетраэдрами. Это позволяет вносить разнообразие в типовые постройки. Главное требование — тетраэдричность. Все остальное не имеет значения — ни размер, ни заряд, потому что каждый претендент хорош по-своему. Сам кремний славится незаурядными качествами — высоким зарядом, широкой распространенностью и коммуникабельностью. Бор, хоть и маленький, но энергичный и все время что-то **бор**-мочет себе под нос. Литий и натрий — крупные, но флегматичные. Мышьяк вредный (хотя и без злого умысла). Фосфор — не от мира сего, он все время светится неземным светом. Бериллий — весельчак, его девиз «**бери или** возьмут другие!».

Дружба кремния с алюминием не в счет, они почти что родственники: и по заряду различаются всего на одну единицу, и по размерам тетраэдров на десятую долю ангстрема. Их часто видят вместе (чего только стоят дворцы семейства канкринита\*). Другое дело, если собирается пестрая компания из Si, Be, P, B, As, Li и Na. Как они находят общий язык, не ссорятся и помогают друг

\* См.: Расцветаева Р.К. Куда крыша поехала?// Сборник научно-популярных статей — победителей конкурса РФФИ 2007 года. Вып.11. М., 2008. С.241—249.

другу? Об их удивительной дружбе вы и узнаете из этой сказки.

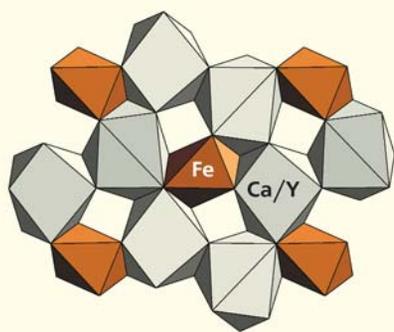
## Серия первая

Древний род **гадолинитов** славится своими строительными традициями. Стены их жилищ сложены не просто из силикатных кирпичей, как в апофиллитовых слюдах, но инкрустированы бериллиевыми тетраэдрами, поэтому и не выглядят монотонными и скучными. В стенах много окон — маленькие квадратные и большие 8-членные.



Ажурные стенки крепятся к массивному фундаменту из блоков — крупных восьмивершинных и мелких октаэдрических, которые соединяются друг с другом и с тетраэдрами стенок ребрами. И хотя блоки плотно пригнаны друг к другу, между ними тоже есть небольшие квадратные окошечки — то ли для вентиляции, то ли для подглядывания за тетраэдрами слева и справа (или сверху и снизу — кому как нравится). Конечно, в октаэдрах помещается только железо и лишь изредка Mg или Mn, а в крупных блоках чего только не бывает, еще и Ca, Y, Yb, Ce и другие редкие земли. Гадолиниты и называются по-разному: гадолинит-Y, гадолинит-Ce или кальциогадолинит. Впрочем, у кальциогадолинита цементный фундамент синтетический (как и все остальное).

Древнейший факунгматит



катионный слой гадолинита

К роду гадолинитов принадлежат и обедневшие братья **хинганиты**. Они похожи друг на друга как две (точнее, три) капли воды и, чтобы различаться, пользуются разными фундаментами. Их так и называют: хинганит-У, хинганит-Ув, хинганит-Се. У всех троих фундаменты только из крупных блоков (на железо не хватило средств). Правда, некоторые осуждают братьев за лень. Вон **минасжерансит-У** тоже бедный, но нашел дешевый материал и зацементировал щели кальцием. Но братья считают, что узкие длинные щели не портят фундамент, зато облегчают общение с верхними и нижними этажами.

## Серия вторая

Однажды в благородном семействе гадолинитов произошел раскол. **Датолит** и **гомилит** были недовольны кремнием, который взял себе в напарники слабосильный двухвалентный бериллий. Другое дело трехвалентный бор. Он, хоть и не вышел ростом, но энергии ему не занимать. С помощью дворцовых интриг они устранили бериллий и посадили на его место бор. Однако вся постройка оказалась слишком заряженной, и пришлось из фундамента убрать редкие земли и заменить их простым кальцием. И только гомилиту удалось сохранить небольшие запасы магния и железа.

А **бакерит** так увлекся революционными идеями, что решил и кремний заменить на бор, но скоро пожалел об этом и вовремя остановился — когда стенка начала скукоживаться и в ней пошли трещины.

Другой член рода — **калькибеборосилит** из Дара-и-Пиеза, что в Таджикистане, хотя и примкнул к революционерам, но занял компромиссную позицию: оставил кремний в покое и даже часть бериллия добавил к бору. Таким образом он понизил заряд стенки и смог частично вернуть в фундамент не только редкие земли, но и железо с марганцем. Вот таким мудрецом оказался этот выходец из Таджикистана. А его собрат из вулканического района Вико (Лацио, Италия) отличился по

своему. Оба именовались по основным жильцам (кальций-бериллий-бор-силиций), но итальянский родственник чуть было не обзавелся пятым жильцом. Вот как это случилось.

Литий на вулкане Вико относится к наименьшинствам и чаще всего проживает в турмалине. Увидев калькибеборосилит, он восхитился красотой ажурных стенок из разнообразных тетраэдров — Si, В и Ве. Это вам не турмалин с его однообразными шестерными кольцами из кремния да октаэдрами из алюминия, в которых литий и проживал. «Хорошо бы поселиться в одном из этих прекрасных тетраэдров!» — размечтался он и, приблизившись к бору, восхищенно воскликнул:

— Панорамо фантастико!

Бор говорил по-итальянски тоже хорошо.

— Кретино! — завопил он, — Куда ты лезешь?

— Неужели все так плохо? — пригорюнился одновалентно-интеллигентный литий. — Я думал, мое место в тетраэдре.

— Ты слишком большой и не сможешь поместиться в моем тетраэдре, как, впрочем, и в кремниевом тоже. Другое дело — бериллий. У нас с ним разница менее 0.2 Å, поэтому мы прекрасно заменяем друг друга.

— Ну извини, я не подумал, — огорчился литий.

А бор поспешил его утешить: — Если хочешь здесь поселиться, забудь о тетраэдрах, спустись этажом ниже — увидишь октаэдры. Там тоже неплохо. Марганцевый великоват, выбери тот, который поменьше, — железный тебе будет в самый раз.

— Ну вот, — вздохнул литий, — опять октаэдр. Но может, оно и к лучшему. По крайней мере, тесно не будет. К тому же он полупустой. — И зашагал на другой этаж.

## Серия третья

**Гердерит** со своим близким родственником **гидроксилгердеритом** тоже происходит из рода гадолинитов. Однако их стало раздражать жесткое правление кремния. Кто он такой, чтобы командовать другими тетраэдрами? Если на то пошло, то существуют претенденты и повалентнее. Гердериты подговорили другого родственника **вайрюненита** свергнуть кремний и посадить на его место пятивалентный фосфор. Заодно можно убрать и железо из фундамента (зарядов и без него хватает, а при этом еще и экономятся средства). Оставили только кальций. Правда, вайрюнениту больше понравился марганец, но это дело вкуса.

А **бергслагит**, хотя и причислял себя к гадолинитам, слыл оригиналом и не разделял пристрастия к высокозарядным тетраэдрам. Ему больше нравились скромные двух- и трехвалентные жители, поэтому он заменил кремний на мышьяк. Решение оказалось смелым, тем более что фундамент у него был тоже низковалентный — кальциевый. Но к чудачествам бергслагита относились с пони-

Древнейший факунгематид

манием: он ученый, что с него возьмешь. Вот недавно услышали как он бормочет: «ран-фни-нир-цип-ноу-фэу». И что же оказалось? Он пытался разобраться в «Положении о разработке плана ФНИ РАН, который формирует НОУ РАН совместно с ФЭУ РАН». Это чиновники Минобрнауки придумали, как заставить ученых трудиться по-честному (ведь они так и норовят что-нибудь недодать родному государству, которое их кормит-поит). Теперь каждый ученый должен написать план, что он придумает на следующий год, передумает через год и додумает через два года. И если он чего-то не додумает, его лишат зарплаты.

— Но как ты можешь знать, что ты придумашешь даже сегодня? — спросили бергслагита.

— Ну знать-то не обязательно. Важно придумать, что ты можешь придумать. А если ты не можешь придумать, тебя заменят другим, кто может придумать, что он сделает не то что через три года, а хоть через 10 лет.

— И какие у тебя планы на ближайшие 10 лет?

— Фундаменты из дешевых Са-блоков, видите ли, вышли из моды. В век нанотехнологий ученые нашего НИИ должны создать новые синтетические фундаменты на основе крупных блоков из La, Sm, Nd, Dy, Gd, Er, Tm, Lu и мелких блоков из октаэдров Fe, Mg, Co, Zn, Cu, Mn, Cd. Конечно, эти материалы удорожат строительство и никогда не будут использованы, но мы все равно должны их синтезировать.

## Серия четвертая

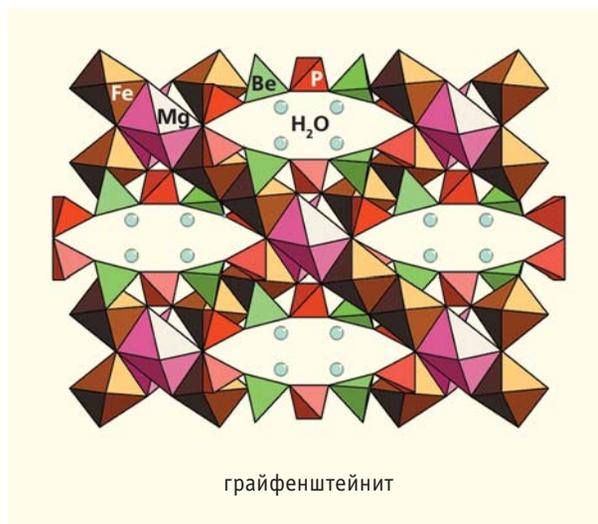
Однажды фосфор решил вообще обойтись без кремния и пригласил бериллий совместно построить что-нибудь сногшибательное. Бериллий славился веселым нравом и любил компании, а компания с высокозарядным фосфором особенно престижна. Правда, фосфор постоянно светит своим фосфоресцирующим светом. Бериллий решил, что такие эффекты, хотя и вредны для глаз, зато создают праздничную атмосферу. Да и ко всему можно привыкнуть...



Фосфор задумал построить заведение для дискотек и других увеселительных мероприятий. Он взял на себя большую часть тетраэдров. Проект оказался великолепным: пять тетраэдров (фосфор, конечно же, и в центре, и по краям),

взявшись за руки, выстроились полукругом. Точно такие же полукружия зацепились друг за дружку, и вот диковинные гирлянды с фосфорными светлячками, как на новогодней елке, готовы. Их развесили на разной высоте и прикрепили к балкам из октаэдров, положенным крест-накрест также на разной высоте. В местах скрепления железные балки соединены полупустыми октаэдрами магния и для прочности скреплены кальциевым цементом. Между балками предусмотрены также бассейны (молекулы воды) для желающих освежиться.

Минерал назвали по месту его жительства (Грайфенштейн, что в Саксонии) **грайфенштейнитом**. Он привлекал внимание и своими оливково-зелеными радиально-лучистыми кристаллами до 5 мм длиной. Грайфенштейнит стал популярен, и, по слухам, его видели даже в Англии в Гуннслэйке, что близ Корнуолла.



«Ну что ж, — подумал бериллий. — Конечно, эта постоянная иллюминация раздражает, но, в конце концов, могло быть и хуже, а здесь по крайней мере весело — не жизнь, а сплошной праздник».

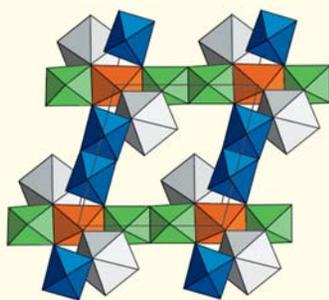
Окрыленный успехом фосфор решил расширить свой бизнес. Однако при строительстве другого заведения, под названием **рошерит**, выяснилось, что доставленные балки состоят не из железа, а из марганца. Фосфор удивился, его вполне устраивало железо: оно достаточно твердое (4) и тугоплавкое (температура плавления 1535°C). Правда, тяжеловатое (удельный вес 7.5), но небольшая добавка магния и алюминия делает его легче. Конечно, и в грайфенштейните есть марганец, но он находится в полупустом октаэдре и ничего не портит. А в рошерите, наоборот, как раз железо добавлено в полупустой октаэдр, и немного (для вида) — в центральные октаэдры, которые полностью заполнены марганцем. Поставщик заявил, что при выборе материала марганец выиграл тендер у железа.

— Какой тендер? — удивился фосфор.

— Такой, — лаконично ответил поставщик. — Ты отстал от жизни, сидишь тут и сияешь, а про рыночные отношения не думаешь. Кто больше даст, тому и тендер в руки.

Крыть было нечем, и фосфор смирился, хотя марганцевый рошерит выглядел не таким нарядным, как грайфенштейнит — какой-то мутноватый, чуть желтоватый и даже зеленоватый.

— Ничего не поделаешь — утешал себя фосфор. — Хорошо хоть не кривой (триклинный по-научному), как **атенсионит**, проживающий на руднике Галилея в Минас-Жераисе, что в Бразилии. Он построен из магниевых балок. Хотя в них тоже добавлены железо, марганец и алюминий (как в **занацциите** из Лавры-да-Илы в той же провинции Минас-Жераис), но это не спасает положение: они мягкие, вот каркас и покосился.



занацциит

Однако беспределу не было конца. Там же в Бразилии, на Пиренеусе, фосфор увидел вместо железа цинк.

— А это что за хаус? — от изумления фосфор перешел на английский.

— Хаус как хаус, — откликнулся цинк тоже на чистейшем английском. Вон в Москве бывшая столовая «Академическая» называется «Котлета Хаус». У них там есть еще и «Кофе Хаус».

— Устаревшая информация, забудь про академиком, теперь это заведение называется рыбным рестораном «Золотой Остап», туда пускают только олигархов. Но я не об этом. Ты что, тоже по тендеру?

— Ну, — с достоинством ответил цинк. — По нему, родному. А что такого? Я уже и с железом подружился.

— Да у тебя же твердость в два раза меньше, да и легкоплавкий ты. Случись в заведении пожар, так балки не выдержат.

— Не бойсь, хозяин, обойдется! — бодро пообещал цинк.

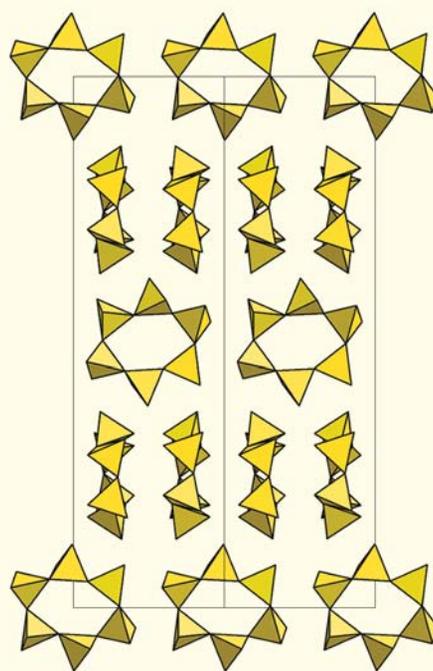
Но больше всего тендер отличился, когда подмешали к марганцу литий. Это случилось на горе Фут Майн в далекой Калифорнии (США). У них там в Америке все возможно, но чтобы одновалентный литий поместить в компанию двух- и трехвалентных, это уже слишком... Однако

в **футмайните** литий повел себя скромно. Он уединился в самом пустом из двух полупустых октаэдров и никому не мешал. И хотя футмайнит тоже покосился, но это вряд ли по вине лития.

## Серия пятая

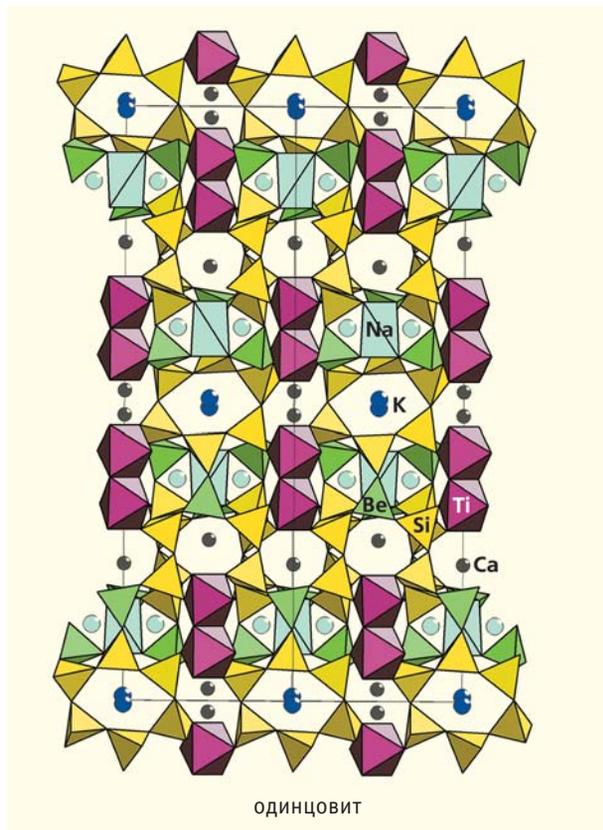
Мало кому известный **одинцовит** проживал на далеком севере Маломурунского массива. Он любил безлюдные якутские просторы и вел уединенный образ жизни. Одинцовит слыл сторонником древних традиций и построил себе жилище из простых силикатных кирпичей в виде круглых коттеджей. Коттеджи имели форму шестичленных колец, но не таких, как в берилле, кордиерите, миларите, турмалине, а также скоутите и ловозерите, где все тетраэдры смотрят в одну сторону, а, скорее, как в диоптазе, где они развернуты по очереди в противоположные стороны. Кольца выстроились в шеренги и расположились в шахматном порядке, а между ними разместились другие шеренги, поставленные боком.

Идея оказалась удачной. Все коттеджи изолированы, никто друг другу не мешает, живи без суеты и медитируй сколько хочешь. Но вот беда — не сцепленные друг с другом коттеджи стали расплзаться. Для их укрепления одинцовит пригласил натрий. Слабосильный народ вольготно расположился в просторных 8-вершинных помещениях и не смог как следует подпереть силикатные кирпичи. Тогда одинцовит позвал на помощь калий. Но толку от него было не больше: он только с виду богатырь, а сил у него тоже мало. И да-



тетраэдрический мотив одинцовита

Дипломатский фракциястатус



же более крепкий кальций не мог спасти положение — коттеджи продолжали разъезжаться. Одинцовит попробовал часть натрия (вместе с литием) поместить в плоские тетраэдры, почти квадраты. Он слышал, что в эвдиалитах такие квадраты используют как распорки между октаэдрическими кольцами. Но и это не помогло, кольца того и гляди упадут друг на друга. Спасти положение могли только прочные тетраэдрические кирпичи. Но лишнего кремния не было. Пришлось закупить партию бериллиевых тетраэдров, но и их не хватало. И тогда на помощь пришел титан, да не один, а со своим братом-близнецом. Они буквально бок о бок (сдвоенные октаэдры, по-научному) ухватились за шесть тетраэдров из разных колец. Их титанический труд не пропал даром: кольца стояли как вкопанные. Опасность миновала, и сооружение, наконец, стало устойчивым.

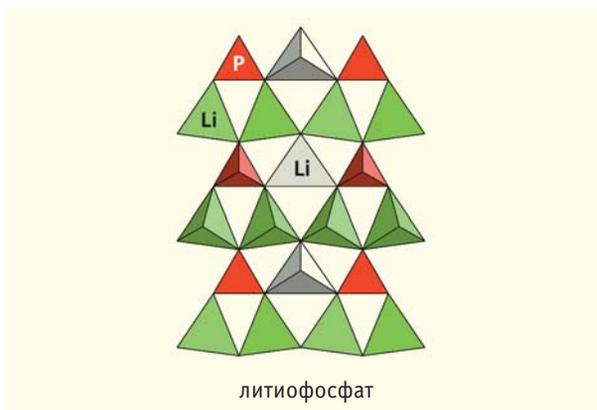
Вот только окружающие удивлялись, глядя на пеструю компанию: до сих пор никто не встречал бериллия в обществе титана, да и с калием его видели только единожды — в ловдарите. Тем не менее все семеро — Si, Be, Ti, Na, K, Ca и Li — прекрасно разместились, и каждый на своем месте оказался незаменимым. Вот что значит настоящая дружба и взаимопомощь.

Конечно, теперь одинцовиту было не до уединения... Но мы всегда стоим перед выбором: покой, но в тоскливом одиночестве, или общение, но в суете.

## Серия шестая

Однажды в стране разразился кризис. Склады опустели: кремний растащили по кирпичику, бериллиевых тетраэдров тоже не осталось. Сохранились лишь кое-какие тетраэдры фосфора, но этого дорогостоящего материала явно не хватало ни на одно сооружение. В достатке были только крупные детали — литиевые и натриевые, а они плохо сочетались с маленькими фосфорными кирпичиками. Но делать нечего — пришлось осваивать новые технологии и совмещать несовместимое.

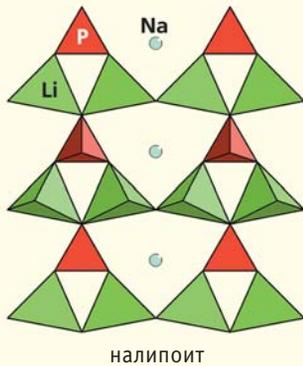
**Литиофосфат** ( $\text{Li}_3\text{PO}_4$ ) из далекой и холодной Сибири назван «простенько и со вкусом» по составу (литий + фосфат). Он заменил Be-тетраэдр двумя Li-тетраэдрами. Об изящной цепочке нечего было и мечтать, получилось нечто похожее на ленту с рваными краями  $\text{P}-2\text{Li}-\text{P}-2\text{Li}-\text{P}..$  к тому же двустороннюю: пара Li-тетраэдров вместе с P-тетраэдром смотрят в одну сторону, а на другом участке такие же «шипы» торчат в противоположную сторону.



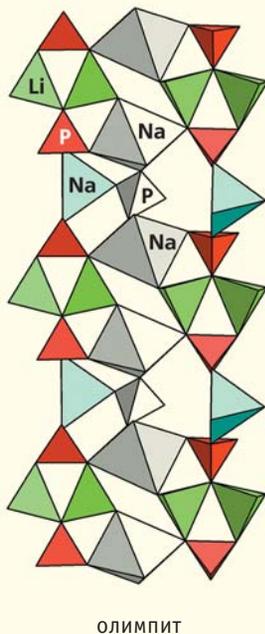
Ленты вытянулись параллельно друг другу и объединились в слой через выступающие по бокам Li-тетраэдры. Мелкие P-тетраэдры не дотягивались друг до друга, пришлось вставлять между ними еще дополнительный тетраэдр лития. Теперь слой с помощью торчащих из него шипов мог зацепиться сверху и снизу за другие слои. Несмотря на странноватый вид лент, каркас получился на удивление изящным и ажурным. Ему стали завидовать и другие минералы.

Житель Сентилера **налипоит** ( $\text{NaLi}_2\text{PO}_4$ ), тоже названный по элементам (натрий-литий-PO), захотел построить себе такой же дом. Ленты получились — точь-в-точь как в литиофосфате  $\text{P}-2\text{Li}-\text{P}-2\text{Li}-\text{P}..$  похожие на новогодние слочки. Но налипоит не учел, что лития у него маловато, и для их объединения в слой пришлось использовать натрий, который не захотел тесниться в тетраэдре и устроился с комфортом между лентами в октаэдре. Ленты разъехались почти на целый ангстрем, однако каркас устоял и не развалился.

Пример налипоита вдохновил и другие малолитиевые минералы.



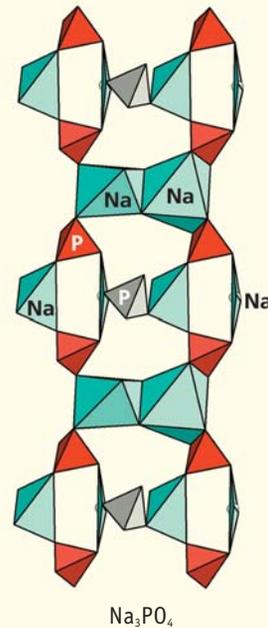
**Олимпит** ( $\text{Li}_{0.5}\text{Na}_{2.5}\text{PO}_4$ ) точно не знал, откуда он родом — то ли из Хибинских, то ли из Ловозерских тундр, — но очень гордился тем, что назван в честь Олимпийских игр 1980 г. Правда, лития в нем еще меньше, чем в налипоите, и даже на ленточку не хватает, зато натрия хоть отбавляй (в пять раз больше!). Олимпит попробовал втиснуть Na в тетраэдр, однако два громоздких натриевых тетраэдра в одну ленту не поместились и пришлось пожертвовать одним из них. Лента потеряла симметричность и стала кривобокой. Возникли и другие трудности: кривобокие ленты  $\text{P}-2\text{Li}-\text{P}-\text{Na}-\text{P}-2\text{Li}-\text{P}-\text{Na}$ ... никак не удавалось объединить в слой. Пришлось использовать вставки  $\text{Na}-\text{P}-\text{Na}$ , в которых натрий капризничал и никак не желал влезать в тетраэдр, с трудом уговорили его на 5-вершин-



ник. В результате ленты раздвинулись еще больше. Слой (и конечно же каркас) получился не таким компактным, как в налипоите, тем более в литиофосфате. В нем оказалось много дыр, которые пришлось затыкать опять же натрием (ничего ведь больше нет). А натрий уже не стеснялся и требовал

6- и 7-вершинные помещения. В результате дом разросся и стал в пять раз больше, чем у литиофосфата и налипоита.

Но олимпит остался довольным: какая-никакая, но все же ленточка есть, не то что в этом **синтетическом**  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ . Судите сами, что можно построить вообще без лития. Конечно, натрий заместил оба лития в ленте, но какой ценой: фосфорный тетраэдр сильно развернулся, а Na-тетраэдры обособились друг от друга, причем один из них так сплюснулся, что стал похож на плоский квадрат. Да и от самой ленты остался только модуль



$\text{P}-2\text{Na}-\text{P}$ . Модули кое-как стянули в подобие ленты  $\text{P}-2\text{Na}-\text{P}-\text{Na}-\text{P}-2\text{Na}-\text{P}-\text{Na}$ ... с помощью Na-октаэдров, которые тут же сцепились по ребру. От дополнительной цепочки остались только одиночные P-тетраэдры, благодаря которым удалось кое-как объединить ленты в слой. Но каркас получился настолько дырявым, что его пришлось буквально латать разнокалиберными полиэдрами натрия, слепленными друг с другом как попало — и вершинами, и ребрами, и даже гранями. Среди этого хаоса ленты совсем затерялись.

Поразмыслив, олимпит решил, что ему все же повезло: его дом самый большой и оригинальный и вполне оправдывает свое громкое имя.

### Эпилог

Мы все такие разные и не всегда находим общий язык. Гадолиниты, рошериты, олимпиты и многие-многие другие жители минерального мира смогли воспользоваться различиями на благо всех и каждого в отдельности. А не взять ли и нам с них пример? Давайте попробуем! ■

# Парадоксы корнепластики

В.Н.Комаров,

кандидат геолого-минералогических наук

Российский государственный геолого-разведочный университет им.С.Орджоникидзе  
Москва

В 2002 г. я очень кратко познакомил читателей со своей коллекцией резьбы по дереву, большая часть композиций в которой выполнена в стиле корнепластики\*. С тех пор в труднодоступных районах Горного Крыма найдено много новых образцов, общее число которых превысило 400. Однажды, когда я рассматривал экспонаты, мне показалось, будто передо мной странные зашифрованные тексты. Заинтересовавшись этим, я вскоре нашел в коллекции аналоги всех арабских цифр, а также всех букв русского алфавита. Спе-

цифика материала сделала их удивительно необычными, чем-то напоминающими замысловатые буквы, с которых в детских книгах начинаются сказки. Хотелось бы отметить, что данный материал уникален, по крайней мере мне ранее ничего подобного не встречалось. Подобрать такую композицию чрезвычайно трудно. Могу об этом сказать со всей определенностью на основании более чем 25-летнего опыта коллекционирования образцов дерева из совершенно разных ландшафтных условий.

В заключение хотелось бы отметить, что подобранные экспонаты нигде прежде не показывались. Читатель видит их впервые. Мы приводим и первое слово, написанное новым шрифтом. ■

\* См.: Комаров В.П. Поэзия, застывшая в дереве // Природа. 2002. №2. С.148—151.

© Комаров В.Н., 2010



# Перевоплощения Лернейской Гидры

О.М.Иванова-Казас,  
доктор биологических наук  
Санкт-Петербург

Смена облика и поведения мифологических персонажей (мифозоев) подобна эволюционным изменениям живых существ. Только мифологическая эволюция\*, в отличие от биологической, обусловлена главным образом не адаптацией организмов к различным условиям существования, а изменениями в менталитете людей, создающих и пересказывающих мифы. Иногда эта эволюция протекает очень постепенно, а иногда — скачкообразно, напоминая перевоплощение (реинкарнацию). Нечто подобное произошло и с Лернейской Гидрой, что интересно в связи не только с мифологией, но и с историей зоологии.

Согласно космогоническому мифу древних греков, наш мир сначала был заселен хтоническими (рожденными богиней Ге-ей, т.е. самой Землей) чудовищами, с которыми потом сражались и которых истребляли герои. Гидра родилась от двух таких чудовищ — полулюдей-полузмей Ехидны и Тифона, у которого к тому же были птичьи крылья (или только перья). Потомство у этой пары оказалось очень пестрым: сестрами и братьями Гидры стали Химера, Сфинкс, трехглавый пес Цербер и некоторые другие мифозои (ее двоюродным или троюродным братом был, возможно, и Змей Горыныч). А сама Гидра имела вид огромной девятиголовой

змеи, причем одна из ее голов была бессмертной. Такая многоголовость делала Гидру особенно опасной, хотя и лишала ее способности протискиваться через узкие щели. Гидра жила на болоте недалеко от города Лерна, почему ее обычно и называют Лернейской. Она пожирала скот целыми стадами и опустошала окрестности. Знаменитому древнегреческому герою Гераклу (римляне называли его Геркулесом) было поручено убить Гидру, но сделать это оказалось нелегко. Стрельба из лука только раздражила ее. Тогда Геракл начал сбивать головы Гидры палицей, но на месте одной слетевшей сразу же вырастали две новые. Победить Гидру ему удалось только благодаря помощи его племянника Иолая, который прижигал место отрубленной головы горящей веткой и тем препятствовал ее восстановлению. Последнюю, бессмертную, голову Гераклу пришлось закопать глубоко в землю и положить поверх целую скалу. Затем он рассек тело Гидры и окунул наконечники своих стрел в ее ядовитую желчь. Раны, нанесенные этими стрелами, хотя и не всегда были смертельными, но приносили много мучений и никогда не заживали.

В этой истории есть одна любопытная подробность. Ревнивая жена Зевса Гера ненавидела Геракла из-за того, что тот был внебрачным сыном ее мужа. Гера послала на помощь Гидре огромного рака (вернее, краба), который ухитрился ущипнуть Геракла за пятку. Когда Геракл убил рака, Гера поместила того

на небо в виде созвездия. Подобного памятника удостоен и Геракл. Таким образом зодиакальное созвездие Рака оказалось у ног созвездия Геркулеса.

Интересно, что на древнегреческих вазах Лернейская Гидра иногда изображалась в виде гигантского осьминога с головами (надо полагать, змеиными) на концах щупалец [1]. Такая химера (комбинация змеи и осьминога) — случай совершенно уникальный, но найти ее изображение мне не удалось, и пришлось восполнить этот пробел собственными силами (рис.1). Совершенно непонятно, однако, почему ни одна из девяти змеиных голов, вооруженных ядовитыми зубами, не укусила Геракла, которому еще только предстояло заслужить бессмертие своими подвигами\*\*.

На наше счастье, Лернейская Гидра не оставила потомства, но и не умерла по-настоящему — ее душа не попала в царство мертвых под стражу трехглавого пса Цербера. Конечно, Цербер мог бы сделать сестричке поблажку и выпустить ее душу на волю, но необходимости в этом не было, так как пока голова Гидры лежала в земле, ее

\*\* Пока настоящая рукопись готовилась к публикации, нашелся новый Эдип — наш старый знакомый Дик, который выдвинул правдоподобное решение этой загадки. По его мнению, самая главная (девятая) голова Гидры просто влюбилась в героя (в Мифляндии этим никого не удивишь). Будучи бессмертной, она ничего не боялась и надеялась на взаимность. Поэтому она приказала остальным головам не кусать Геракла, а только щекотать его своими языками. А когда она потеряла надежду, было уже поздно...

\* Подробнее см.: *Иванова-Казас О.М.* Эволюция мифозоев // Природа. 2007. №4. С.31—34.

дух мог скитаться по миру в виде разных привидений или даже перевоплощаться.

\* \* \*

Теперь нам следует сделать скачок во времени и обратиться к Средним векам. Еще до начала новой эры в Древней Греции и в Риме появились философы, которые пытались перейти от мифологического образа мышления к научному и высказывали суждения, основанные на наблюдении реальных фактов. Как известно, первым замечательным естествоиспытателем был Аристотель (384—322 гг. до н.э.). Он описал более 500 видов рыб, насекомых и других животных, наблюдал развитие куриного зародыша, метаморфоз бабочки и пчелы, а также сделал первую попытку систематизировать животных. Однако находящиеся в его распоряжении сведения было недостаточно для построения рациональной системы. Тем не менее правильность многих наблюдений Аристотеля подтверждена современной наукой.

Большой вклад в развитие зарождавшейся научной зоологии внес также римлянин Плиний Старший (23—79 гг.). Хотя сам он не занимался исследованиями, но собирал сведения о животных, содержащиеся в сочинениях разных авторов и в устных рассказах. Собранных им материалов хватило на 37 томов «Естественной истории», которая была издана после его смерти (а погиб он при извержении Везувия) его племянником Плинием Младшим.

Однако дальнейшее развитие зоологии было пресечено распространившимся в Европе в начале 1-го тысячелетия христианством, которое отвергло язычество, а заодно и первые достижения науки. В Средние века наука считалась греховным суетумдирем — следовало воспринимать мир таким, каким его создал Бог, и незачем в том копать. Хотя содержание трудов Аристотеля и Плиния считалось непреложной истиной, но читали их, ви-



Рис.1. Геракл и Гидра в виде осьминога.

димо, не особенно внимательно. Европейцы не ведали об описанном Аристотелем метаморфозе насекомых, и его вторично «открыл» Сваммердам в XVII в. Зато сильно развиты были различные суеверия, а так как «сон разума рождает чудовищ» (что наглядно показано на одном из офортов Ф.Гойи), произошел рецидив химеротворчества.

В период между II и IV в. в Александрии (Египет) появилась написанная неизвестным автором на греческом языке книга — «Физиолог», в которой были описаны разные животные (не только явно фантастические). Выдержки из книги и комментарии к ним дает А.Г.Юрченко [2], отметивший, что автора «Физиолога» интересуют не сами животные, а их символика, позволяющая «раскрыть божественные цели и определить правила, которые должен соблюдать истинный христианин» (с.10). Материалы, содержащиеся в мифологии, и сведения более поздних античных авторов (тоже не лишённые ошибок) приводятся в «Физиологе» в искаженном виде и в новом освещении. Книга переведена на разные языки и многократно пере-

издавалась с дополнениями. Кроме того, стали появляться и многочисленные «бестиарии», авторы которых давали полную волю своей фантазии.

Обладая более мрачным, чем у древних греков, менталитетом, средневековые обыватели превратили гармоничных и по большей части благообразных классических химер в нескладных уродов и создали большое количество новых причудливых монстров, украшающих страницы старинных фолиантов и даже собор Парижской Богоматери. (Чего стоит сама идея украшения христианский храм изображениями бесов! На мой взгляд, это результат какого-то извращения религиозного чувства.) Позднее эти нелепые страшилища существовали рядом с прекрасными творениями художников эпохи Возрождения.

Таким образом, возникла самая благоприятная обстановка для реинкарнации Лернейской Гидры. В одном из бестиариев появился семиглавый бескрылый дракон, имеющий спирально закрученный хвост, одну пару вооруженных когтями ног и семь голов на длинных шеях. Головы у него были не змеиные,

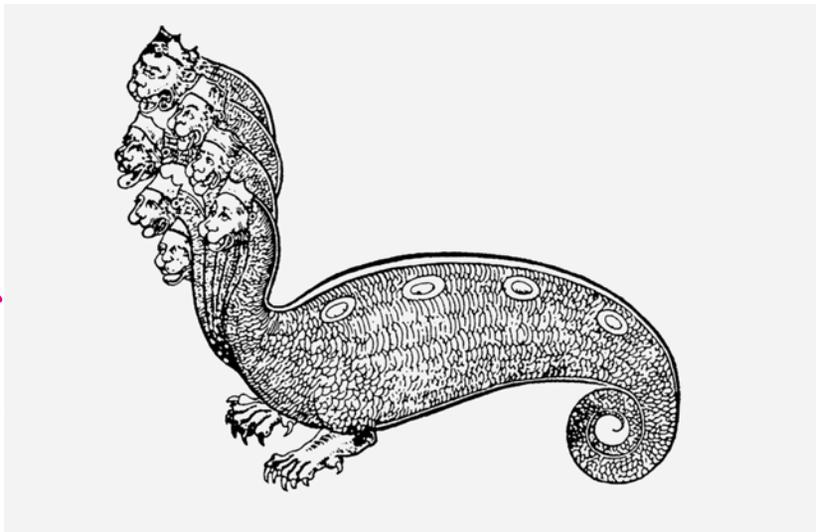


Рис.2. Семиглавая Гидра [4].

а звериные, похожие на львиные (рис.2). Однако существовали и другие его разновидности — у некоторых из них были крылья летучей мыши. Это чудовище стали называть Семиглавой Гидрой. Относительно ее образа жизни сообщалось только, что она враждовала с крокодилами — стоило одному из них заснуть с открытым ртом, как она заползала в его живот и убивала изнутри. Это символизировало искупление грехов: «крокодил олицетворял смерть, а Гидра — Христа, сходявшего в ад, чтобы вывести оттуда грешников» [3]. Конечно, людям, развращенным материалистическим миропониманием, понять всю глубину этой символики трудно. Никаких других сведений о биологии Семиглавой Гидры нет, а по характеру она явно не похожа на Лернейскую.

Позднее, когда естественные науки начали завоевывать подобающее им место в общественном мнении, стали появляться кунсткамеры — небольшие музеи, в которых любители собирали разные диковинки. Нашлись также предприимчивые люди, умеющие подделывать музейные экспонаты и продавать их за приличные деньги. Чучело Семиглавой Гидры (см. рис.2) хранилось в таком музее в Вене-

ции и, по слухам, было потом продано французскому королю за 6 тыс. талеров. Другое чучело Семиглавой Гидры (похожее, но не вполне идентичное) находилось в Голландии еще в XVIII в. Эти подделки иногда вводили в заблуждение и образованных людей.

Решительный шаг в сторону настоящей зоологии и ботаники сделал Конрад Геснер (1516—1565 гг.), который оставил нам пять томов «Истории животных». Он достаточно критично относился к разным бестиариям, но в его книги все-таки попало несколько «небылиц» — Морской Черт, Морской Монах и Семиглавая Гидра. Этот переход от фантастики к науке красочно описан в книгах Н.Н.Плавильщикова [4] и В.Н.Танасийчука [5].

\* \* \*

В то время натуралисты гораздо лучше знали мифологию, чем зоологию, поэтому неудивительно, что одно маленькое и очень просто устроенное пресноводное животное назвали гидрой. Оно было найдено в XVII в. А.Левенгуком, а потом хорошо рассмотрено и описано А.Трамбле, об экспериментах которого подробно рассказано в книге С.Д.Степаньянц и др. [6]. По совету Реомюра Трамбле обычно на-

зывал это животное полипом и лишь изредка гидрой «в метафорическом смысле», так как оно показалось ему похожим на мифологическую Лернейскую Гидру. В 1758 г. К.Линней дал ему научное (латинское) название *Hydra*, а в просторечии его стали называть пресноводной гидрой. Тем самым гидра была признана не мифологическим персонажем, а существом, которое живет по биологическим законам. Действительно, в отличие от Лернейской и Семиглавой, пресноводные гидры успешно размножаются (половым путем и почкованием), так что в некоторых водоемах они встречаются в больших количествах; кроме того, вскоре выяснилось, что существует несколько видов пресноводных гидр. Все они имеют тело цилиндрической формы длиной около 2 см, одним концом прикрепленное к субстрату. На другом его конце находятся рот и около десятка щупалец (рис.3). По общей форме тела эти гидры действительно немного напоминают Лернейскую, но головой у них можно считать только верхний конец с единственным ротовым отверстием, щупальца же, хотя и помогают захватить добычу, ротовых отверстий не имеют.

При всей своей простоте пресноводная гидра — это миниатюрный хищник, не менее опасный для животных своей «весовой категории», чем Лернейская Гидра для коров и овец. Хотя у нее нет ни зубов, ни когтей, наша гидра хорошо вооружена — в ее покровном эпителии содержится множество стрекательных клеток (книдоцитов), снабженных шипом. Внутри каждой такой клетки находятся пузырек, наполненный ядовитой жидкостью, и тонкая спирально скрученная нить (см. рис.3). При химическом или механическом раздражении эта нить «выстреливает» — быстро распрямляется и вонзается в обеспокоившее гидру животное. Уколы сразу многих стрекательных клеток отравляют и парали-

зуют мелких животных, а у крупных вызывают болезненные ожоги. Стрекательные нити некоторых книдоцитов очень липкие и помогают удерживать добычу, которую гидра обвивает щупальцами. Ротовое отверстие и стенки тела этих животных сильно растягиваются, поэтому они способны заглатывать пресноводных олигохет, дафний и даже мальков рыб.

Функция стрекательных клеток еще не была известна Трамбле. Свои наблюдения за питанием гидры он подкрепляет цитатой из «Метаморфозов» Овидия: «Так-то в глубине вод полип, схватив свою жертву, держит ее, со всех сторон опутав руками...». Тут возникает вопрос: какое животное называет Овидий полипом? Упоминает его и Гомер в 5-й песне «Одиссеи», где тонущий в бурном море Одиссей уцепился и особенно тесно прижался к какой-то скале, чтобы его не смыла волна:

*Если полипа морского из домика  
силою вырвать,  
Видно на щупальцах много  
приставших к ним камней  
мельчайших.  
Так же и к твердому камню утеса  
пристала вся кожа  
С рук Одиссея...*

Но древние греки и римляне знали только известковый скелет коралловых полипов, а не самих животных, считая кораллы окаменевшими водорослями. А если так, то ни о каких щупальцах или руках не может быть и речи.

Ответ на интересующий нас вопрос мы находим у Аристотеля, который уже знал колониальных морских полипов, но называл полипами также и головоногих моллюсков. Это прекрас-

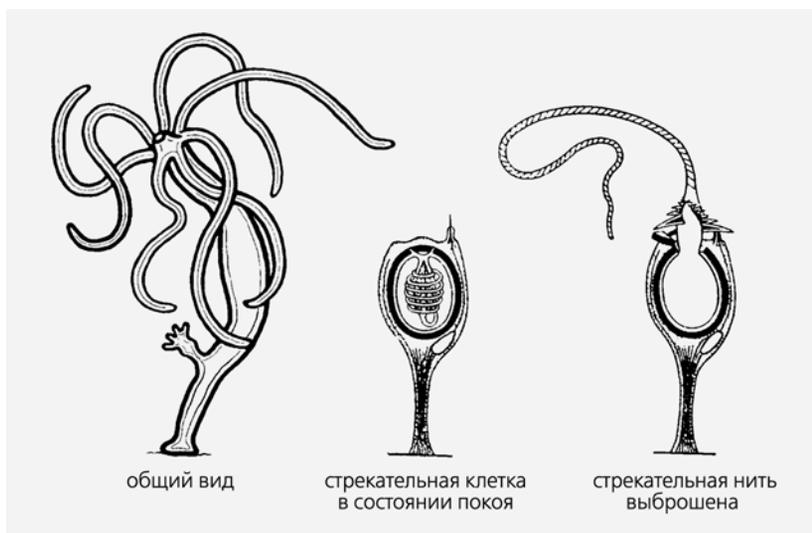


Рис.3. Пресноводная гидра (из разных источников).

но согласуется и с тем, что Лернейскую Гидру изображали в виде осьминога. А само слово «полип» (polypus) означает, по видимому, «многоногий».

Следует также упомянуть, что пресноводные гидры обладают удивительной живучестью — если их разрезать на несколько частей, то из каждого куска может развиваться целый организм; эта живучесть тоже напоминает о Лернейской Гидре.

\* \* \*

Ознакомившись с эволюционными преобразованиями, которым подверглась древнегреческая Гидра за последующие два-три тысячелетия, можно высказать некоторые общие соображения. В разные эпохи под этим названием существовали (в воображении людей или в действительности) совершенно различные существа.

По всей вероятности, Лернейской Гидре не очень понравилась та роль, которую навяза-

ли ей средневековые сочинители-ханжи. Что же касается нашей пресноводной гидры, то, хотя ее внешнее сходство с Лернейской очень поверхностно, по духу (если у них таковой имеется) они очень близки. Главным же «эволюционным достижением» пресноводной гидры следует признать ее превращение в нормальное живое существо.

К слову, после того Мифляндия была упразднена современным деловым и прозаическим человечеством (ее последние остатки сохранились лишь в некоторых уголках земного шара), примеру Гидры последовали и многие другие обитатели этой страны. Геракл превратился в жука-геркулеса, ужасная горгона Медуза — в сравнительно безобидное животное, циклопы — в ракообразных, а Аврора, Аполлон, Махаон и многие другие мифологические персонажи порхают в виде прекрасных бабочек. Но эта тема заслуживает особого рассмотрения...■

## Литература

1. Грейвс Р. Белая богиня. Екатеринбург, 2005.
2. Юрченко А.Г. Александрийский «Физиолог». СПб., 2001.
3. Беляев А.Г. 100 чудовищ древнего мира. М., 1997.
4. Плавильщиков Н.Н. Гомункулос. М., 1958.
5. Танасийчук В.Н. Невероятная зоология. М., 2009.
6. Степаньянц С.Д., Кузнецова В.Г., Анохин Б.А. Гидра от Абрама Трамбле до наших дней. М., 2003.

# Самец размножался!

## Из научных трактатов

*Плановое изогнутие обвальных тел...*

*Это был самец, и он размножался!*

*...по мере накопления в организме состояния нестабильности.*

*Изверженные магмы — это продукты длительной внутриочаговой дифференциации атомов земной коры или мантии.*

*При конкуренции идет борьба за более жирный кусок пирога, а не за жизнь.*

*Например, наблюдая за лидером в группе подростков, демонстративно проявляющих свое бунтарство в парке, путем прослушивания громкой музыки, общения с использованием «нестандартных» слов и жестов и т.д. среди гораздо взрослой публики, то, будучи исследователем в области социального поведения и находясь в состоянии усталости, или депрессии, поведение лидера выглядит «вызывающе»...*

*Борьба за существование подразумевает то, что вид оставляет потомство, а конкуренция этого не подразумевает.*

*Аристотель открыл археоптерикса.*

*Линней — конформист, а Бюффон — трансформист.*

*Надо помнить, что в окружающем нас мире постоянно царит закон «общей нежности».*

*Но среди 28 300 видов четвероногих позвоночных (земноводных, пресмыкающихся, птиц и млекопитающих) науке неизвестно ни одного, продолжительность жизни которого не превышала бы один год.*

*...совместно ночуют поодиночке...*

*...ящерицы спариваются и обмениваются половыми продуктами.*

*В Предуралье посевом внутренних органов выявлены рыжие полевки...*

*...они планируют обустроить Землю Франца-Иосифа, чтобы он стал похож на норвежский Шпицберген...*

*...я предлагаю «практически императив», основанный на физиологии морали...*

*Выпустив Уголька, все разрешилось.*

*Соорудив подобие мышинной норы из стеклянной бутылки, все встало на своем месте.*

*Чарльз Линей.*





# ПРИРОДА.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ

ПОПУЛЯРНЫЙ ЕСТЕСТВЕННО - ИСТОРИЧЕСКИЙ

**ЖУРНАЛЪ ДЛЯ САМООБРАЗОВАНІЯ**

ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ

*проф. В. А. Вагнера и проф. Л. В. Писаржевскаго.*

Философія естествознанія. Астрономія. Физика. Химія. Геологія съ палеонтологіей. Минералогія. Общая біологія. Зоологія. Ботаника. Человѣкъ и его мѣсто въ природѣ.

АПРЕЛЬ.

МОСКВА.

1912 г.

## Памяти великого русского физика П.Н.Лебедева

Профессор П.П.Лазарев

**1** марта 1912 г. в 1 ч 20 мин дня скончался Петр Николаевич Лебедев, и в этих коротких словах, которые на следующий день стали известны в отдаленных уголках России, заключается целая трагедия, эти слова заставили сжаться сердца у всех, кому дороги успехи естествознания в России.

С именем Лебедева уже давно связывалось у всякого представление не только об крупном европейском ученом, обогатившем свою науку рядом блестящих открытий, но и об учителе, создавшем целую школу физиков, которые занимают ответственные места в ряде высших учебных заведений нашего отечества. Потери, подобные только что понесенной, тяжелы везде — не сразу можно найти людей, которые смогли бы заменить навеки ушедшего от нас ученого, — но у нас в России при ее бедности научными силами такая потеря является совершенно незаменимой, тем более что умер Лебедев только 46 лет от роду, когда наука могла ожидать от него еще ряда блестящих открытий, когда только что начали сказываться плоды долгой предварительной работы Петра Николаевича

как организатора и основателя школы. Если мы примем далее во внимание еще и то, что до Лебедева в России совершенно не имелось центров для научной работы по физике, то ясно станет, какую крупную в научном отношении величину мы потеряли, как тяжело должна отозваться эта смерть для всех тех, которые ближе стояли к покойному ученому. Самая жизнь Лебедева, как жизнь ряда представителей науки, сложилась оригинально, и в нижеследующих строках я попытаюсь в кратких словах дать характеристику важнейших работ П.Н. в связи с событиями его личной жизни.

Родился П.Н. в Москве в купеческой семье и первоначально подготовлялся к коммерческой деятельности. Но рано появившаяся склонность к научным занятиям заставляет П.Н. бросить открывавшуюся перед ним блестящую в материальном отношении карьеру, и он поступает сначала студентом в Московское техническое училище, а затем переходит в Страсбургский университет, где и начинает специализироваться по физике. В то время Страсбургский университет являлся во многих отношениях центром научной жизни Европы, там в это время были профессорами такие крупные силы, как Кундт по физике, Гольц по физиологии, и это обстоятельство привлекало постоянно в Страсбург массу иностранцев, в том числе и рус-

Редакция сочла уместным воспроизвести сразу две различающиеся по сути статьи П.П.Лазарева о крупнейшем русском физике П.Н.Лебедеве и сопроводить их комментарием одного из давних сотрудников института, носящего его имя.

ских. Лебедев попал в Страсбург как раз в то время, когда слава Кундта достигла своего максимума, когда помимо ряда русских физиков, ставших учениками Кундта (из их числа следует упомянуть кроме Лебедева еще князя Б.Б.Голицына, Гольдгаммера, Де-Метца, Коновалова, Михельсона, Натансона, Терешина, Ульянина, Щегляева), у него в лаборатории работали англичане, американцы и французы, когда на еженедельных коллоквиумах, посвященных обзору текущей литературы, перед слушателями на кафедре «дефилировали», по выражению П.Н., «все народности, слышалась немецкая речь не только с разными местными оттенками объединенной Германии, но и со всеми теми национальными отзвуками и неправомерностями, с которыми говорят иностранцы, начиная от Сан-Франциско до Токио».

В этой международной школе физиков довелось работать молодому Лебедеву, и в этой школе сложились его научные идеалы, идеалы, которым он оставался верным всю жизнь. Насколько хороши и теплы были отношения между великим учителем и его выдающимся учеником, видно из ряда писем и воспоминаний П.Н., где проглядывает почти что обожание Кундта. Но недолго пришлось пробыть П.Н. в Страсбурге. Через год, в 1888 году, Кундт получил приглашение перейти в Берлин на кафедру, занимаемую раньше Гельмгольцем, и он принял это приглашение. Тотчас вслед за Кундтом переселяется в Берлин и Лебедев, не желавший покинуть своего учителя, и здесь в Берлине Лебедев продолжает ту лихорадочную работу, работу днем и ночью, которую он начал в Страсбурге. Одновременно П.Н. посещает лекции по теоретической физике у Гельмгольца, которые оставляют у него неизгладимое впечатление. Совершенно случайное обстоятельство заставляет его снова переселиться в Страсбург. По правилам Берлинского университета докторант должен был представлять латинскую диссертацию, и это обстоятельство не позволило Лебедеву, не знавшему латинского языка, получить степень доктора в Берлине. Впрочем, это переселение подходило к настроению П.Н., который очень не любил Берлина с его шумной столичной жизнью и очень ценил тихий патриархальный Страсбург, и только разлука с Кундтом и Гельмгольцем была тяжела для П.Н.

Воспоминания о берлинском периоде жизни были у Лебедева очень хорошие. Товарищами его в институте у Кундта в это время являлись Рубенс, Дюбуа, Рапс, Аронс и другие физики, со-



П.Н.Лебедев

ставившие себе почетное имя в науке. Особенно яркие впечатления оставили заседания немецкого физического общества, заседания, на которых постоянно присутствовали и докладывали Дюбуа-Реймон, Гельмгольц. Насколько ярки были эти впечатления, видно из следующего: много лет спустя, именно в 1905 г., П.Н. на специальном курсе по современным успехам физики в Московском университете излагал теорию волн на границе двух сред. В этом изложении П.Н. ввел ряд подробностей, которых не было в работах у Гельмгольца, и когда пишущий эти строки после лекции спросил П.Н., откуда им взяты эти детали, он сказал, что все это говорил во время своего доклада

в обществе Гельмгольц и что вся лекция была пересказом этого доклада.

По переселении в Страсбург П.Н. с жаром принимается за докторскую работу, в очень короткое сравнительно время заканчивает ее и получает степень доктора.

Эта первая печатная работа (о диэлектрических постоянных газов) молодого ученого показала в нем хорошего экспериментатора и доставила ему место ассистента в Московском университете при лаборатории проф. Столетова, а впоследствии проф. Соколова. С первым из них у П.Н. сразу установились те хорошие отношения, которые могут установиться только у крупных ученых, и о Столетове П.Н. вспоминал постоянно с благодарностью до самого последнего времени.

Со старой физической лабораторией связаны те крупнейшие работы, которые сразу выдвинули Лебедева на первое место среди русских физиков и которые доставили ему европейское имя. Его работы в это время находились в связи с тем течением в физике, которое ведет начало со знаменитых работ Максвелла об электромагнитной природе световых колебаний, и с первым опытным их обоснованием, с гениальными работами Герца. Эти работы были задуманы еще в 1891 г., как об этом свидетельствуют записи в книгах П.Н., и вся остальная деятельность его являлась развитием этих основных представлений. Прежде всего П.Н. исследует пондеромоторные действия (явление притяжения и отталкивания) в волнах электромагнитных, волнах акустических и водяных на те резонаторы, которые помещены в среду и в которых волны могут возбудить колебание. Ставя прибор, дающий колебание, и прибор, их улавливающий, друг против друга, Лебедев наблюдал их взаимодействие, и эти взаимодействия привели его к установ-

лению строгих законов взаимодействия резонаторов, законов, важных в молекулярной физике. Эти работы доставили П.Н. русский докторский диплом и профессуру в Москве, а вместе с тем доставили ему и лаборатории, так как до этих пор собственной лаборатории у него не было. В это время П.Н. явился деятельным членом О.Л.Е.А. и Э. (Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии. — *Примеч. ред.*), где делал ряд сообщений, часто выступал публично на лекциях, и вообще этот период деятельности П.Н. был отмечен стремлением приложить свои силы на служение обществу и России. Работы над резонаторами приводят Лебедева к важному с точки зрения астрофизики выводу, именно, что и световые волны должны оказывать давление на молекулы газа, которые являются резонаторами, и что явление кометных хвостов — явление, не объясненное до сего времени, представляется лишь частным случаем общего закона, закона давления света. Короткая работа, опубликованная еще в 1891 г., дала общую теорию этих явлений в предположении, что можно все наблюдаемое для длинных электромагнитных волн и резонаторов перенести на волны световые и молекулы газа. Однако одной блестящей мысли было еще недостаточно, необходимо было ее обосновать, и в течение целого ряда лет шаг за шагом, устраняя затруднения, П.Н. открыл световое давление сначала на твердые тела (1900), а затем и на газы (1910). Насколько значительны были затруднения, особенно в последней работе, видно из того, что одних окончательных приборов, с которыми были произведены опыты, было построено до 20, и первые из них появились в виде чертежей в записных книгах П.Н. еще в 1903 г. Нужно отметить также, что большая часть наиболее сложных частей аппаратов была выполнена П.Н. собственноручно и только это обстоятельство позволило ему так блестяще доказать то, что казалось в ближайшее время экспериментально невыполнимым.

Этими работами завершился цикл работ по пондеромоторному действию волн. Работы эти произвели на физиков огромное впечатление, и величайший физик нашего времени В. Томсон в разговоре с Тимирязевым прямо сказал, что Лебедев впервые убедил его в справедливости учения Максвелла. Работы эти доставили Лебедеву премию Императорской Академии наук и избрание его в почетные члены Лондонского Королевского института. Уже заканчивая свою последнюю работу по световому давлению, П.Н. начинает интересоваться сущностью магнетизма. Все участвовавшие в последнем съезде естествоиспытателей и врачей помнят, какое впечатление произвели демонстрации Лебедевым его модели земного шара. Опыты над вращением тел, которыми Лебедев хотел отделить положительные и отрицательные заряды и таким образом создать поле, аналогичное полю Земли, при первых попытках не дали положитель-

ных результатов и единственная работа, опубликованная пока на русском языке, показала, что все гипотезы такого центробежного магнетизма не могут объяснить магнетизма Земли. Эта последняя работа была закончена уже после ухода из университета, в прошлом году, и нужно только удивляться, сколько силы, сколько таланта было у П.Н. в то время, сколько он мог еще дать в будущем. Но не долго ему удалось работать над этой последней задачей, в январе 1912 г. он почувствовал себя плохо, слег в постель, а 1 марта его не стало.

В короткой статье невозможно указать всего значения работ Лебедева. Достаточно может быть, однако, указать, что теперь нет и не может быть учебника физики, где имя Лебедева не встречалось бы. Короткие «лебедевские волны», «лебедевское» давление света на твердые тела и давление на газы — это такие завоевания, из которых каждое могло бы доставить ученому почетное место в науке. Но не только в личном творчестве, не только в печатных работах сказался талант Лебедева. Он сказался также в тех специальных работах, которые в России были введены Лебедевым впервые и которые являлись развитием его экспериментальных работ. Эти работы, привлекавшие уже с самого начала массу специалистов в лабораторию, дали возможность целому ряду людей познакомиться с физикой в ее истинном смысле слова, заставили полюбить тот прогресс науки, ради которого совершается работа. Отношение работающих в лаборатории к своему знаменитому учителю все время было самое теплое, товарищеское, и это отношение особенно резко сказалось, когда Лебедеву пришлось устраиваться на новом месте, в Университет имени Шанявского. В короткий срок, в 2—3 месяца, с помощью практикантов все было налажено, и лебедевский подвал университета переселился в новое помещение. Насколько эта лаборатория в настоящее время приспособлена к занятиям, видно по прилагаемым фотографиям, представляющим снимки лаборатории.

В замечательной речи, посвященной памяти своего учителя Кундта, П.Н. в 1894 писал так: «В лице Кундта наука потеряла физика в самом широком смысле этого звания: не только первоклассного ученого, так много потрудившегося для современной физики, но и несравненного учителя, который заботился о будущем своей любимой науки, образуя и воспитывая ей будущих деятелей. Если Кундт в течение всей своей жизни, неутомимо работая, старался возможно более расширить область нашего знания своими исследованиями, то, может быть, в еще большей мере он стремился передать каждому из своих учеников частичку своей души, частичку той бескорыстной любви к знанию, которая ведет человечество к истине». Эти же слова с глубочайшей благодарностью по отношению П.Н. повторяют все те, кому довелось быть его учениками и работать в его лаборатории.

# ПРИРОДА

популярный  
естественно-исторический журнал

Подъ редакціей

проф. Э. К. Кольцова, проф. Л. А. Тарасевича  
и старш. мих. Акад. Наукъ А. Е. Ферсмана.

Перепечатка статей и воспроизведение рисунковъ, помѣщаемыхъ въ журналъ  
„Природа“, могутъ быть разрѣшены лишь по особому соглашенію.

№ 3

Третье изданія шестой

1917

## Взгляды П.Н.Лебедева на организацию научных исследований

Проф. П.П.Лазарев

Первого марта 1917 года исполнилось пять лет со дня смерти П.Н.Лебедева, и мне как ближайшему его сотруднику хотелось бы познакомить русское общество с мыслями П.Н. по поводу насущного вопроса момента — по поводу организации русской науки. В этом отношении драгоценным материалом являются письма П.Н. ко мне за период 1906—1911 гг., в которых наряду с личными вопросами, которых пока нежелательно было бы касаться, содержатся интереснейшие суждения по поводу развития школы, ведения преподавания в высших учебных заведениях, наконец, мысли, касающиеся популяризации науки. Наибольшее число писем относится к периоду 1909—1910 гг., когда за болезнью П.Н. и за отъездом его за границу мне по предложению факультета пришлось вести его лабораторию в Московском университете и читать за него его курс. К этому же времени относились и первые попытки моей руководительской деятельности, вызвавшие значительную переписку между нами. Мысли, подробно развитые в письмах, долго занимали П.Н.Лебедева и предполагались им даже к опубликованию, как это видно из письма от 20/IV 1910 г. из Rapallo, где П.Н., сообщая о проектах своих литературных работ, пишет:

«После той депрессии в мышлении, которая была у меня в последние годы, теперь, после отды-

ха, — и согласно Вашему предсказанию — охота что-то делать опять зашевелилась, как когда-то; и у меня проектов больше, чем я могу выполнить, так как сейчас моя трудоспособность до жалости мала и я, кроме того, и принуждать себя не хочу к усидчивому труду, так как он мне еще теперь, очевидно, вреден; вот почему я работаю чуть-чуть и больше мечтаю.

Так, я собираюсь написать статейку “Статистика преподавания физики на земном шаре”, — для чего взял *Minerva* за 1909/1910 и подвожу статистику по всем странам — эта работа дает совершенно неожиданную картину всемирной физики, со всеми ее характерными особенностями для отдельных стран, — это будет справкой, интересной или, вернее, просто курьезной; и эта работа настолько нехитрая, что я ее делаю вечером, чтобы с свободной головой лечь и приступить к чтению Фарадея.

Другая работа — “О ведении лаборатории”, которую я предполагал бы сначала доложить на съезде физиков, а потом напечатать, содержала бы изложение того, как была пущена в ход наша лаборатория и какие трудности тут встречаются: она могла бы быть полезна многим не столько тем, что она дает, сколько тем, над чем она заставляет задуматься.

Потом у меня намечается ряд реферативных работ, связанных с тем курсом дополнительных глав по физике, которые я буду читать в весеннем семестре». Далее в письме идут проекты работ по магнетизму вращающихся тел и другие научные темы. Хотя статьи, указанные выше, никогда не были напечатаны и не осталось даже набросков в записных книжках П.Н., однако по письмам легко восстановить полную картину его воззрений на организацию лабораторных исследований и на отношение к ним Университета.

Университет и его лаборатории всегда представлялись Лебедеву научным, а не учебным учреждением; учебные занятия с их неизменным циклом обязательных предметов и экзаменов всегда представлялись Лебедеву лишь придатком к той основной задаче, которую должен выполнять университет.

По поводу одного моего сообщения, что некоторые работающие в нашей лаборатории студенты, затратив слишком много времени на лаборатории, не могут держать экзамена, Лебедев писал: «Меня очень огорчили и взволновали Ваши сообщения, что ряд практикантов не могут держать экзамена в этом году: я думаю, что это яркая иллюстрация к тому трагическому положению, которое совершенно произвольно создается нашей лабораторией для работающих в ней студентов».

Все то, что было непосредственно важно для развития научной деятельности лаборатории, встречало со стороны Лебедева и живой интерес, и желание затратить на это свои силы и время. Так, например, когда выяснилось, что большой наплыв желающих работать не позволяет мастерской лаборатории выполнять все приборы для практикантов, П.Н. наладил обучение практикантов в мастерской Громова и создал даже целую программу таких занятий, что значительно упростило ведение лаборатории и позволило самим работающим по чертежам П.Н. строить необходимые для своего исследования приборы.

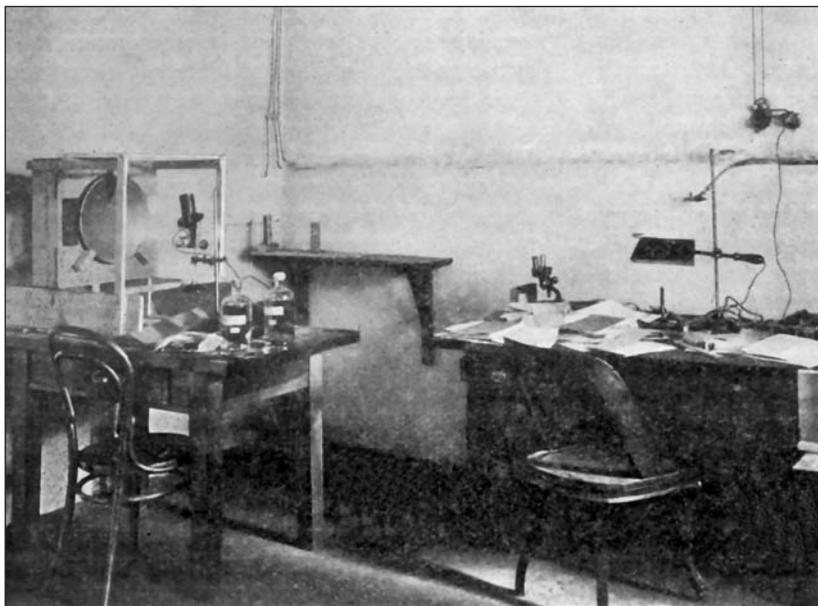
Когда мне пришлось взять на себя самостоятельное руководство частью работ в лаборатории П.Н. и пришлось долго думать над организацией подготовки практикантов к моим темам — физико-химического характера, Лебедев мне писал: «Я знаю, что темы, мною предлагаемые, всегда были очень трудны технически, — но я думаю, что раньше, когда не было условия обязательного обучения у Громова, — это было полезно как



П.Н.Лебедев

школа ремесла, а теперь, когда “Университет Громова” обязателен, они не так трудны... Той же трудностью страдают и Ваши темы, но у Вас они лежат в другой области: в незнании нашими студентами химии и, может быть, в той же мере в незнании практической математики... нам приходится заботиться об этом домашними средствами, и устроить нечто вроде мастерской Громова в этом направлении безусловно необходимо, но как?.. Я очень боюсь навязывать именно Вам лишнюю работу, но дело без Вас не может обойтись — я мог бы быть только поддужным — не найдете ли Вы возможным в один из рабочих дней в лаборатории, т.е. между 1 час. — 5 час., организовать семинарий по физической химии исключительно для лиц, работающих

в лаборатории или интересующихся коллоквиумом... Устройство таких семинариев было бы очень желательно для всей лаборатории, так как прореха в этом отношении сильно дает себя чувствовать, а у действительно образованного физика не может быть терпима: будущее физики лежит не в эфире, а в материи». Полагая главную цель университета в создании кадров научных работников, Лебедев придавал огромное значение руководству, и это и составляло, по мнению Лебедева, главную задачу университетского работника. Требования, предъявляемые руководителем специальных исследований к самому себе, должны быть очень большие, и вот как характеризует П.Н. свои отношения к этому вопросу: «Давая тему начинающему, т.е. взявшись за задачу формировать будущего ученого, мы должны совершенно ясно себе представить и свою нравственную ответственность перед данным лицом. Искалечить такого начинающего нет ничего легче: дать ему интересную тему, но такую, которая ведет к ряду неожиданных промежуточных трудностей, — он затянется на деталях, проработает больше известного срока, на опыте разочаруется — и дело готово. Конечно, из 20 случаев в 19 это будет не жалко, но сказать вперед, кого из 20 жалко потерять, — невозможно, а потому всех начинающих надо ставить в выгодные для них условия. Поэтому начинающему вы имеете нравственное право давать только такую задачу, вполне определенный и достижимый результат которой вы безусловно можете гарантировать. (Nauheim 6/VII 09)». В одном из позднейших писем (2/IV 10) встречаются такие места: «Результаты



Рабочая комната П.Н.Лебедева в его лаборатории в Университете им.А.Л.Шанявского.

Сребницкого<sup>1</sup> меня и заинтересовали, и обрадовали; это Ваш первый преднамеренный шаг подготовить фабрикации гомункулусов: явление интересно само по себе, но еще большее значение оно имеет ввиду огромной области практического приложения в физиологии. Я очень рад, что Ваш первый опыт самостоятельного руководства так удачно начался, и мне, старому воробью, хотелось бы поделиться с Вами, что пришлось передумать... Мне думается, что вопросы физиологии сейчас находятся в том же положении, что и вопросы физико-химии до Оствальда и Вант-Гоффа: физиолог с знанием физики — или наоборот — может сыграть теперь огромную роль в истории науки и один на целое десятилетие подвигнет всю физиологию вперед: от физиологической химии мы переходим теперь к механизму организации... Я Ваших планов для будущих работ не знаю, и, может быть, говорю то, о чем Вы и сами уже не раз думали, — но я это сказал “на всякий случай”, потому что ожидаемой прямолинейности и специализации работ Ваших учеников я не вижу: я понимаю, что разбросанность тем вызвана наличием известного инвентаря; она может

<sup>1</sup> «О скоростях распространения химических реакций». Отмечу здесь, что и в последующих письмах П.Н. возвращается к той же работе и говорит: «Теперь опять о Сребницком. Меня очень занимают его опыты потому, что они могут быть очень важны для Вашей теории — и те курьезы, которые наблюдаются в зависимости от степени тяжести, конечно, требуют выяснения». Позднее, в 1911 г., Сребницкому была присуждена за эту работу физическая премия имени Мошнина, и в присуждении ее участвовал П.Н.

быть даже полезна для данного состава работающих — я говорю теперь: “может быть”, хотя прежде сказал бы: “безусловно”, но с годами я все больше и больше вижу, что “случайные” темы, не входящие в строго определенный цикл исследований, очень отягощают руководителя, так как приходится пробовать многое для приобретения навыков и знаний, которые дальше остаются ненужными. А то педагогическое значение, которое я прежде приписывал разнообразию тем и областей исследований, предполагая, что практиканты многому учатся друг у друга, это значение, как я теперь убедился, ничтожно мало в лаборатории и важно только на коллоквиуме — но и тут все сводится к индивидуальности, а поэтому тот выигрыш для науки, который получается при одностороннем на-

правлении исследований в лаборатории, неизмеримо больше, чем сомнительная польза от разнообразия для практикантов». Далее, переходя к оценке специализации научных задач в лаборатории, П.Н. пишет: «Лиц с собственной волей, собственными талантами и интересами специальная лаборатория может только немного задержать в развитии, но не испортить их; для “среднего” практиканта, который может делать только то, чему его учили, специальная лаборатория будет разрезом — но и черт с ним. Я думаю, что борьба со “средним” ученым — самая необходимая борьба для пользы науки... Я все это говорю потому, что сам очень много и очень беспокойно обдумывал задачи руководства: если между руководителем и учеником и нет письменного договора, то все-таки интересы данного ученика, по естественному предположению, являются целью его обучения.

С этой точки зрения я сперва и подошел к задаче, поставив целью лаборатории чисто педагогические требования; но достигать их я прежде старался активно, уча, а теперь думаю, что в интересах дела — достигать их пассивно, т.е. давая возможность учиться: сделать физика я не могу, я должен только облегчить желающему и способному сделать физиком. И с этой точки зрения узкоспециализированная лаборатория может дать желаемое, а значение ее для науки будет, конечно, гораздо больше, чем от универсальной лаборатории. Наконец, в частном случае нашей лаборатории разнообразным склонностям открыт широкий простор, так как Ваши и мои вкусы достаточно различны, а вос-

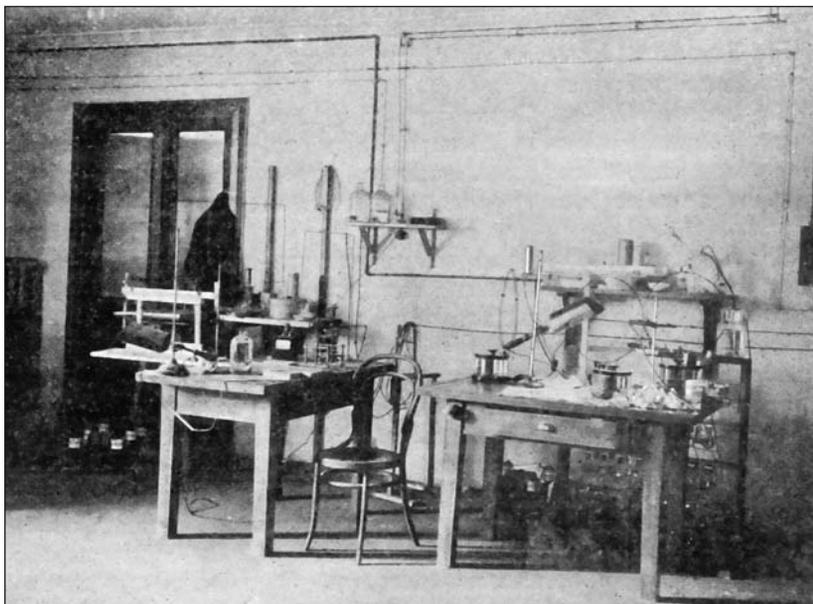
питательное значение этих противоположностей очень выгодно для практикантов.

Все это я сказал, чтобы выяснить, что специализация тем в лаборатории, очень выгодная для науки, не будет вредна или бесполезна для практикантов; а если это так, то и сомневаться в выборе тем не приходится.

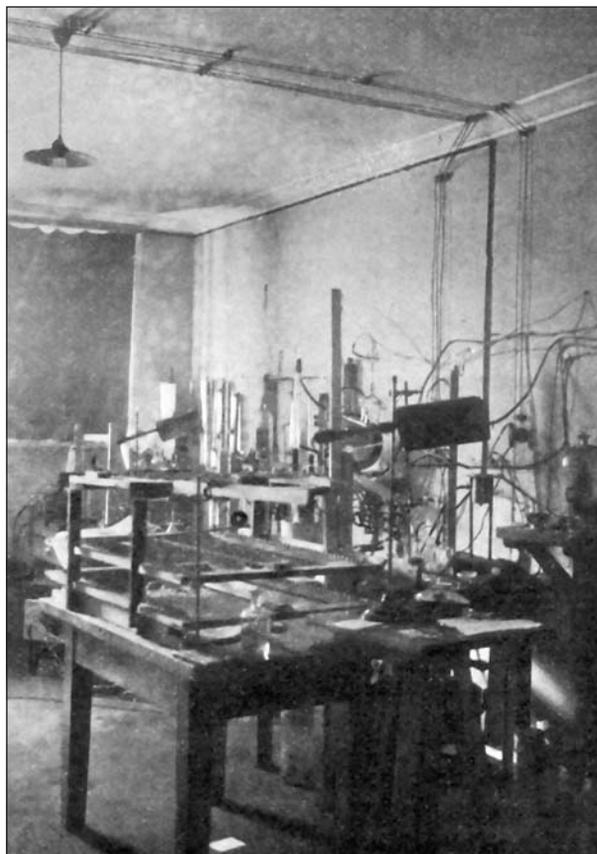
Таково общее решение вопроса.

Переходя к частностям, к отдельным конкретным темам, я думаю, что задание должно быть возможно просто: безусловно выгодно интересный вопрос не сразу схватывать в окончательной форме, а разбить работу на этапы и шаг за шагом идти вперед: как бы мала ни была тема, для новичка она колоссальна, и в интересах правильного и здорового укрепления в нем чувства самоуверенности — а воспитанию этого чувства должна способствовать первая работа — надо давать ясно сформулированную тему. Вот над этим вопросом руководителю приходится работать и думать всего больше; он должен иметь полную гарантию, что тему можно обработать, и должен знать и сам для себя выработать весь план работы в деталях. Конечно, искажения и технические промахи неизбежны, но следует всегда помнить, что бесплодное искажение или пробование наобум страшно вредны для практиканта по тому психическому удручению, которое особенно сильно действует на неопытного в таких неприятностях».

Говоря далее о медленности в работах некоторых своих практикантов и перечисляя их отдельные неудачи, П.Н. далее писал: «Не думайте, что мне легко было смотреть, как они не могут справиться: мне все казалось, что я виноват, что не умею их учить — и только долго спустя я понемногу начинаю убеждать себя, что их выучить никто в мире не может, — а потому черт с ними!». Медленное движение работ очень удручало Лебедева с самого начала, и он часто работал за практикантов, как об этом он писал мне на Кавказ из Москвы еще 1907 г.: «Не думайте, что я в июне являюсь "неприкосновенным" — только пять дней назад уехали А и В<sup>2</sup>, а сегодня и на будущее время остались С, D и E. И я по своей бесхарактерности хожу к ним, заставляю Алексея<sup>3</sup> для них



Работы по электрическим колебаниям в лаборатории П.Н.Лебедева при Университете им.А.Л.Шанявского.



Работа по диэлектрическим постоянным газов в лаборатории П.Н.Лебедева при Университете им.А.Л.Шанявского.

<sup>2</sup> Здесь П.Н. указывает имена лиц, состоявших в то время его практикантами.

<sup>3</sup> Механик лаборатории П.Н., ныне механик моей лаборатории в Техническом училище.

работать, по вечерам думаю над их затруднениями — одним словом, не принадлежу себе. За это время я сделал открытие: я поглупел (одурел) от моей учительской деятельности, я завяз в повседневных пустяках; опыт показал, что для того чтобы работа шла скоро, я должен заботиться о всякой мелочи. В действительности я пытался за всех думать (и поэтому, может быть, производил впечатление находчивого руководителя) и, сам не замечая, так забился во всякие пустяки, что мой мозг отвык думать над большими задачами; он был утомлен мелочами, да и времени они не оставляли свободного». Найти нечто среднее — найти такое положение, когда руководитель и сам может работать, и в то же время следит за работой практикантов, — это и была та задача, которая постоянно занимала Лебедева.

Считая важной и существенной для себя учебную деятельность, П.Н. с скептицизмом относился к популяризаторской деятельности вообще и в особенности у нас в России, где он считал широкую публику недостаточно подготовленной для восприятия научных знаний. По поводу одного письма моего, где я излагал П.Н. проекты будущих съездов русских физиков, которые я предполагал назвать Столетовскими. П.Н. писал: «Не знаю, может быть, серое небо тому причиной, но я, вполне сочувствуя Вам и даже завидуя Вашей уверенности в пользе Столетовских съездов, не верю, чтобы такое начинание могло окупить затраченные на него работу и время, т.е. те факторы, которые мы должны расходовать на наши повседневные занятия; не для того чтобы отстаивать мою точку зрения, а совершенно искренно стара-

ясь дать себе отчет о бывшем съезде, я должен себе сказать, что не чувствую какого-нибудь реального последствия от этого каторжного для нас бремени. Я не буду спорить, что, если я буду преподавать физику в воскресной школе, это будет ученикам полезнее и будет лучше, чем преподавание какого-нибудь Иванова или Петрова; но из этого еще не следует, что мне нужно это делать. Может быть, мое органическое отвращение к такой шумной организаторской деятельности обусловлено теперь моей физической и нервной слабостью, большую долю в этом отвращении играет и осадок пережитого горького опыта.

Я помню, как однажды Столетов показал мне на ларь в его передней, где в пыли свалены его не разошедшиеся популярные брошюры, и назидательно мне сказал: «Теперь я знаю, что этого в России делать не следует». Я его тогда не понял и думал, что он не прав — теперь я знаю, что это так.

Под тем же углом зрения рассматривалась П.Н. и его профессорская работа в аудитории, и понятно, что именно у такого чистого, прирожденного «академика», каким всегда был П.Н., и могла возникнуть идея научной лаборатории по физике, о которой еще в 1910 г. во время нашего совместного пребывания в Италии мы много говорили и которая по плану, близкому к тому, что нам тогда рисовалось, теперь реализована в виде Физического института (в будущем ФИАН. — *Примеч. ред.*) Общества Московского научного института. Пусть же в этой лаборатории живут те взгляды, которые развивал в письмах П.Н., и пусть этот Институт явится храмом и рассадником чистой науки, в которой так нуждается Россия.

# Петр Петрович Лазарев

Б.М.Болотовский,  
доктор физико-математических наук  
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН

В истории российской науки можно вспомнить немало ярких людей, оставивших и добрую память о себе, и многих благодарных учеников, и реальный вклад в развитие науки и ее приложений на благо человека. К числу таких людей принадлежат Петр Николаевич Лебедев и Петр Петрович Лазарев. В двух публикуемых статьях П.П.Лазарев с любовью воспроизвел образ своего великого учителя. Справедливо будет рассказать и об ученике.

Петр Петрович Лазарев родился в Москве 1 (13) апреля 1878 г. в семье межевого инженера. Окончив классическую гимназию, поступил на медицинский факультет Московского университета. В 1901 г. окончил его с отличием, и ему было присвоено звание лекаря. В следующем году Лазарев успешно выдержал экзамены на степень доктора медицины и был оставлен при университете ассистентом клиники болезней уха, горла и носа. Однако, насколько известно, лечебной практикой Лазарев не занимался, его интересовали исследования физиологии человека с помощью физических методов. Его можно с полным основанием считать зачинателем развития биофизики в России. Первая из опубликованных им работ была посвящена влиянию разности фаз в волнах, составляющих звуковой сигнал, на восприятие звука. Во второй работе рассматривалась связь между слуховыми и зрительными ощущениями (так сказать, «влияние пения на зрение»). Это направление — биофизика органов чувств —

получила успешное развитие в дальнейших работах Лазарева и его учеников.

Сразу же после окончания медицинского факультета Петр Петрович записался студентом физического факультета. В 1903 г. с особого разрешения министра народного просвещения успешно сдал экзамены по физике за полный курс обучения на физическом факультете и получил диплом первой степени.

В эти годы он познакомился и подружился с профессором Лебедевым. Петр Николаевич оказал на Лазарева сильнейшее влияние. Он перешел в лабораторию Лебедева, где продолжал свои исследования, а также помогал учителю в руководстве исследованиями и самостоятельно руководил практикантами по своей тематике. Собственные исследования Лазарева шли успешно. В 1907 г. он защитил в Москве магистерскую диссертацию под названием «О скачке температуры на границе твердого тела и газа». Он также исследовал фотохимические реакции, в частности выцветание красок под воздействием видимого света. Его результаты признаются теперь важным вкладом в теорию фотохимических реакций, сделанным до появления квантовой химии. Позднее работы по этой тематике стали основой его докторской диссертации. Вскоре Лазарев стал заместителем Лебедева по лаборатории.

В 1911 г. Лазарев вместе с Лебедевым ушел из Московского университета в знак протеста против действий тогдашнего министра просвещения, не желавшего считаться с университетскими традициями, в частно-



П.П.Лазарев

сти с университетской автономией. Решение покинуть университет далось непросто, потому что судьба Лебедева и Лазарева была тесно связана с лабораторией. Но удалось найти такое место, где студенты могли продолжать свою работу с теми же руководителями, — Московский городской народный университет им.А.Л.Шанявского. Туда и перенесла свою работу лаборатория Лебедева. Работы велись отчасти под руководством самого Лебедева, отчасти под руководством Лазарева. В числе учеников Петра Петровича были С.И.Вавилов, Т.К.Молодой, Э.В.Шпольский, П.Н.Беликов, С.Н.Ржевкин и др. Все они стали известными физиками. Кстати говоря, дипломная работа Вавилова, которую он выполнял под руководством Лазарева, была

посвящена выцветанию красок под действием видимого света. Этой темой занимался сам Петр Петрович, ее он предложил и своему дипломнику.

Лебедев страдал сердечным заболеванием, которое обострилось в связи с университетскими потрясениями. Последний год перед кончиной он редко появлялся в лаборатории, и вся научная, организационная и административная работа легла на Лазарева. После смерти Лебедева руководство «лебедевской лабораторией» было доверено Петру Петровичу. Из этой лаборатории впоследствии вырос первый советский научно-исследовательский физический институт. История его создания такова.

В 1909 г. в России было создано Общество содействия успехам опытных наук и их практических применений им.Х.С.Леденцова. Как известно, деятельность общества была обеспечена процентами с огромного капитала, завещанного купцом Христофором Семеновичем Леденцовым. Совет общества принял решение построить здание для лаборатории Лебедева — Физический институт. Незадолго до своей кончины Петр Николаевич составил план лабораторных помещений для будущего физического института. Но безвременная смерть не дала ему увидеть воплощение своего замысла. Замысел этот был осуществлен усилиями Лазарева. На Миусской площади в Москве построили здание и в декабре 1916 г. после торжественного молебна в нем открыли Институт физики и биофизики. После революции он вошел в систему Народного комиссариата здравоохранения, директором остался Петр Петрович Лазарев; многие сотрудники института получили мировую известность — например, С.И.Вавилов, В.В.Шулейкин, Г.С.Ландсберг, А.Л.Минц, П.А.Ревбиндер, С.Н.Ржевкин, А.С.Предводителев, С.В.Кравков, Г.А.Гамбурцев, Н.Т.Федоров, Э.В.Шпольский, П.Н.Беликов и др.

Лазарев был человеком огромной энергии, и все свои силы он отдавал научной работе — фундаментальной и прикладной. Сразу же после революции он взял на себя руководство рентгеновской, электромедицинской и фотобиологической секциями в Народном комиссариате здравоохранения. Это было сделано по предложению наркома здравоохранения Н.А.Семашко. Лазарев потратил много сил на организацию рентгенодиагностики, на обеспечение медицинских учреждений современной рентгеновской аппаратурой. Здесь проявились его качества и как врача, и как физика, и как организатора. В своем институте он создал образцовую рентгеновскую лабораторию. Когда было произведено покушение на В.И.Ленина и потребовалось определить положение попавшей в него пули, его привезли в Институт физики и биофизики.

В 1918 г. Лазарев, Вавилов и Шпольский начали издавать журнал «Успехи физических наук». Сегодня этому журналу уже больше 90 лет, в зарубежной периодике ничего нет похожего, журнал имеет свое лицо. Он полностью переводится на английский язык (силами английского издательства), и тираж его за рубежом растет, хотя в России он падает. Падает не потому, что журнал становится хуже, а потому, что число научных работников в нашей стране катастрофически уменьшается.

В том же 1918-м Лазарев принял участие в исследовании Курской магнитной аномалии, взяв на себя заведование финансовой и административной частью и руководство магнитным, гравитационным и геодезическим отделами. В трудных условиях Гражданской войны был создан большой коллектив исследователей, быстро и грамотно выполнивших все необходимые измерения на значительной территории.

При этом Лазарев продолжал свои работы по биофизике, ис-

следуя возбуждение нервов и мышц под действием различных раздражителей (солевых растворов, электрического тока и др.), разрабатывая фотохимическую теорию зрения, изучая работу нервных центров. Он также продолжал лекционную работу, читая лекции и по физике, и по биофизике.

В Институте физики и биофизики велись также исследования по физической оптике, по геофизике, по электро- и радиотехнике, по физике моря. Невозможно было себе представить, что приближается беда.

В марте 1931 г. Петр Петрович Лазарев был арестован, его институт закрыт, а все сотрудники уволены. Здание занял некий институт спецзаданий. Чем занимался этот институт, никто не знал тогда, и, кажется, никто не знает до сих пор. Причины ареста Лазарева тоже были тайной. Спустя много лет стало известно, что его обвинили в шпионаже: он неоднократно выезжал за границу с докладами о своих работах, состоял в переписке со многими иностранными учеными. Кроме того, Петр Петрович допустил несколько неосмотрительных высказываний. Так, говоря о книге Ф.Энгельса «Диалектика природы», он отметил, что Энгельс плохо знал математику и поэтому его рассуждения о мнимой единице неправильны. Еще одно неосторожное высказывание Лазарев допустил в 1929 г., после очередных выборов в Академию наук. На тех выборах троих кандидатов в академики забаллотировали. Все трое были членами партии большевиков, партии власти. Академическому руководству навязали повторные выборы. Лазарев открыто возражал против этого, он говорил, что при выборах в Академию наук надо руководствоваться не политическими, а научными соображениями. Повторные выборы тем не менее состоялись, и эти трое были избраны. Но высказывание Лазарева могло послужить поводом для арес-

та. А может быть, что-то другое — трудно сказать. Возможно, кому-то понадобилось помещение для института спецзаданий. И здание, занимаемое Институтом физики и биофизики, оказалось подходящим.

Жена Петра Петровича Лазарева, Ольга Александровна, обратилась к нескольким знакомым ей влиятельным людям — к народному комиссару здравоохранения Семашко, к некоторым коллегам и ученикам Лазарева — с просьбой выяснить судьбу мужа и оказать ему помощь. Она надеялась, что этот арест — недоразумение, которое должно вскоре разъясниться. По некоторым сведениям, на одной из встреч Семашко сказал ей, что, по всей видимости, Петр Петрович не скоро выйдет на свободу. Это переполнило ее отчаянием, и она повесилась. Такова одна из версий. Однако И.М.Франк, рассказывая об этом, пишет: «Было ли это действительно самоубийством... или же в какой-то мере ее к этому вынудили — мы достоверно не знаем».

Через полгода Лазарева освободили и отправили в ссылку в Свердловск. На допросах он «признался», что в переписке с иностранными учеными сообщал им научные новости. Обвинять его на этом основании в шпионаже смехотворно, но тогда это было в порядке вещей. Спасло Лазарева то, что многие люди — академик М.А.Мензбир,

некоторые ученики и коллеги — обратились с письмами к властям. Это сыграло свою роль.

Еще через полгода Лазареву разрешили вернуться в Москву. Здоровье его было подорвано, он страдал приступами эпилепсии.

Что касается института спецзаданий, который обосновался на месте института Лазарева, то он через пару лет исчез неведомо куда вместе со своим директором и сотрудниками. С ними исчезло и богатейшее научное оборудование института Лазарева. Осталась только прекрасная научная библиотека.

В 1934 г. в здание вселился только что учрежденный Физический институт им.П.Н.Лебедева АН СССР. Директором института стал ученик Петра Петровича Лазарева Сергей Иванович Вавилов.

Вернувшись в Москву, Лазарев какое-то время приходил в себя после испытанных потрясений. Он был назначен заведующим отдела биофизики во Всесоюзном институте экспериментальной медицины. Эта должность не давала возможности продолжать в сколько-нибудь полном объеме прежние его работы, для этого не было ни оборудования, ни сотрудников. Надо было свыкаться с положением опального ученого. В 1938 г. некоторые работы Петра Петровича подверглись резкой критике, их объявили лженаучными. Это было несправедливо.

Не вдаваясь в существо этих работ, следует помнить, что в научных исследованиях иногда оказывается, что какие-то из первоначальных предположений могут не оправдаться, оказаться ошибочными. Но отрицательный результат — тоже результат; если выясняется, что выбранный путь завел в тупик, впоследствии уже никто не пойдет по этому пути. Такой результат прибавляет знаний. Даже если какие-то из предположений Лазарева оказались ошибочными, все равно его нельзя было обвинять в том, что он занимается лженаукой.

Незадолго до начала войны он получил в Академии наук собственную биофизическую лабораторию. Осенью 1941 г. ее эвакуировали из Москвы в Алматы. Здесь в начале 1942 г. Лазарев плохо себя почувствовал. Ему сделали рентгенограмму грудной клетки и определили далеко зашедший рак легких. Поскольку Лазарев по образованию был врачом, то, увидев рентгенограмму, сразу оценил свое состояние. В ту же ночь он скончался. О непосредственных причинах его смерти говорят разное. По одной версии, смерть наступила внезапно от метастаза в мозг. По другой — Петр Петрович покончил жизнь самоубийством.

Тело академика Петра Петровича Лазарева было перевезено в Москву. Его могила находится на Новодевичьем кладбище. ■

## Литература

1. Автобиография П.П.Лазарева (1941) // <http://library.istu.edu/hoe/personalia/lazarev.pdf>
2. Шпольский Э.В. // УФН. 1945. Т. XXVII. Вып. 1. С. 1.
3. Шноль С. // Знание — сила. 1966. № 10.
4. Франк И.М. Что мы хотим рассказать о Сергее Ивановиче Вавилове // Сергей Иванович Вавилов: Очерки и воспоминания. М., 1991.

# Новости науки

## Астрономия

### Алькор — двойная звезда

Теперь, когда число звезд, внесенных в каталоги, исчисляется сотнями миллионов, трудно ожидать чего-то интересного от тех нескольких тысяч, что видны невооруженным глазом. Тем не менее даже это небольшое и, казалось бы, вдоль и поперек изученное подмножество звездной семьи все еще способно преподносить сюрпризы. Когда вы в следующий раз посмотрите на ковш Большой Медведицы, обратите внимание на среднюю звезду в ручке ковша. В хорошую темную ночь зоркий человек без труда увидит, что звезд там в действительности две — Мицар и Алькор, очень известная звездная пара, которая в древности использовалась для проверки зрения. При этом долгое время считалось, что на самом деле они друг с другом не связаны и находятся рядом лишь в проекции на небосвод.

Уже во времена Галилея было известно, что сам Мицар — двойная звезда, причем это была первая двойная звездная система, обнаруженная с помощью телескопа. Много лет спустя (в XIX и XX вв.) выяснилось, что оба компонента этой пары — Мицар А и Мицар В — сами являются двойными, так что Мицар оказался даже не двойной, а четверной системой. И вот в конце 2009 г. сразу две группы астрономов сообщили о том, что двойной звездой оказался также и Алькор. Больше того, он, вероятно, все-таки составляет с Мицаром реальную пару, так что на самом деле речь идет уже не о двойной или четверной, а о шестерной системе.

Периоды обращения в широких звездных парах слишком велики, чтобы взаимное движение

звезд можно было обнаружить за короткий период времени. Поэтому обычно для выявления связи между двумя звездами используется метод общего собственного движения: звезды считаются парой, если вместе движутся по Галактике (и, естественно, находятся рядом друг с другом на небосводе). Группа Н.Циммермана из Колумбийского университета (США) предложила использовать для решения той же задачи более экономичный метод: отслеживать не общее собственное движение, а общее параллактическое смещение звезд, связанное с тем, что из разных точек орбиты Земли они видны под немного разными углами<sup>1</sup>.

В марте 2009 г. Циммерман с коллегами, наблюдая Алькор с помощью коронографа и системы адаптивной оптики, установленной на пятиметровом телескопе Паломарской обсерватории (Калифорния, США), заметили рядом со звездой еще одну слабую точку. Через 103 дня астрономы провели повторные наблюдения и удостоверились, что два объекта действительно смещаются вместе по отношению к далеким фоновым звездам из-за годичного движения Земли вокруг Солнца, т.е. являются компаньонами. Если бы обнаруженная точка была фоновой звездой или галактикой, она, конечно, не могла бы смещаться вместе с Алькором.

Другая группа, которую возглавил Э.Мамаек из Рочестерского университета, проводила тестирование нового метода получения изображений внесолнечных планет с помощью телескопа Аризонского университета (США), также оборудованного системой адап-

<sup>1</sup> Zimmerman N. et al. // *Astrophysical J.* 2010. V.709. P.733–740; <http://arxiv.org/abs/0912.1597>.

тивной оптики<sup>2</sup>. Им тоже удалось разглядеть слабый спутник Алькора. В отличие от первой группы они не только отметили присутствие спутника, но благодаря ему смогли объяснить небольшие колебания в собственном движении Алькора, попутно оценив массу его меньшего брата — Алькора В, составляющую примерно треть массы Солнца. По мнению Мамаека и его коллег, именно неучтенное тяготение спутника является причиной того, что траекторию Алькора до сих пор не удавалось «вписать» в общую физическую систему с квадруплетом Мицара.

Алькор и Алькор В находятся в 80 св. годах от нас и обращаются друг относительно друга с периодом не менее 90 лет. Ученым удалось определить цвет, светимость и даже примерный химический состав Алькора В, поскольку изображения объекта были получены одновременно в нескольких спектральных диапазонах. Спутник намного меньше и холоднее Алькора А, но, вероятно, именно он служит источником аномально высокой рентгеновской светимости Алькора — яркость в рентгеновском диапазоне свойственна именно таким небольшим звездам.

Красные карлики нечасто обнаруживаются у более ярких и массивных звезд, подобных Алькору А, но новое открытие указывает, что в действительности они могут оказаться довольно распространенными. Кроме того, всегда интересно узнать, что даже самые яркие и известные звезды неба все еще скрывают секреты.

© Д.З.Вибе,

доктор физико-математических наук  
Москва

<sup>2</sup> Mamajek E. et al. // *Astronomical J.* 2010. V.139. P.919.

**Физика**

**Манипуляция магнитными вихрями в сверхпроводнике**

Достаточно сильное магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде магнитных вихрей, каждый из которых несет на себе один квант магнитного потока. Вне области, занимаемой вихрями, сверхпроводимость сохраняется, но при пропускании через образец электрического тока вихри могут прийти в движение, что приведет к диссипации энергии и появлению конечного сопротивления. При практическом использовании сверхпроводников с этим борются, например, искусственно создавая в них так называемые центры пиннинга (смещения петли гистерезиса), на которых вихри закрепляются и остаются неподвижными даже в присутствии тока. Поведение вихревой решетки (а также вихревой жидкости и вихревого стекла) как целого изучалось очень детально, но экспериментальные данные о динамике отдельных вихрей практически отсутствуют.

Группа физиков из США, Израиля и Канады сообщила<sup>1</sup> о разработке методики наблюдения за отдельными магнитными вихрями с использованием магнитного

<sup>1</sup> Auslaender O.M. et al. // Nature Phys. 2009. V.5. P.35—39.

силового микроскопа. Когда его острая игла приближается к поверхности сверхпроводника, на нее действует сила со стороны выходящего на эту поверхность магнитного вихря. Измеряя отклонение иглы при сканировании поверхности, можно получить изображение «среза» вихревой системы. Поскольку игла, в свою очередь, тоже действует на вихрь, удастся «зацепить» один-единственный вихрь и либо оторвать его от центра пиннинга, к которому он прикреплен (определив при этом силу пиннинга), либо «протащить» его по образцу, измеряя попутно взаимодействие вихря с потенциалом дефектов, либо даже «намотать» один вихрь на другой. Для эксперимента использовали монокристалл высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{6.991}$ . Обнаружена, в частности, существенная анизотропия силы пиннинга. Анализ показал, что это может быть связано с образованием удлиненных кластеров из приблизительно 10 кислородных вакансий вдоль цепочек Cu—O.

Новую методику предполагают использовать для изучения механизмов пиннинга и высокотемпературной сверхпроводимости. Кроме того, она позволяет задуматься о разработке нового типа логических устройств, в которых информацию будут переносить магнитные вихри. Не исключено,

что с помощью вихрей удастся управлять отдельными спинами в спинтронных или квантовых информационных устройствах.  
http://perst.issp.ras.ru (2009. Т.16. Вып.3).

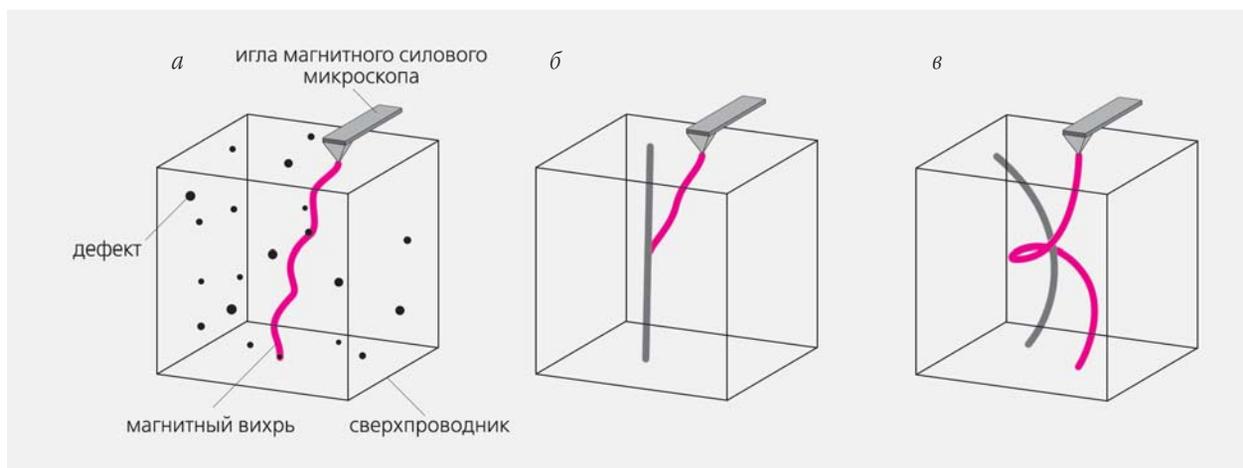
**Химия**

**Гибкие углеродные трубки большого диаметра**

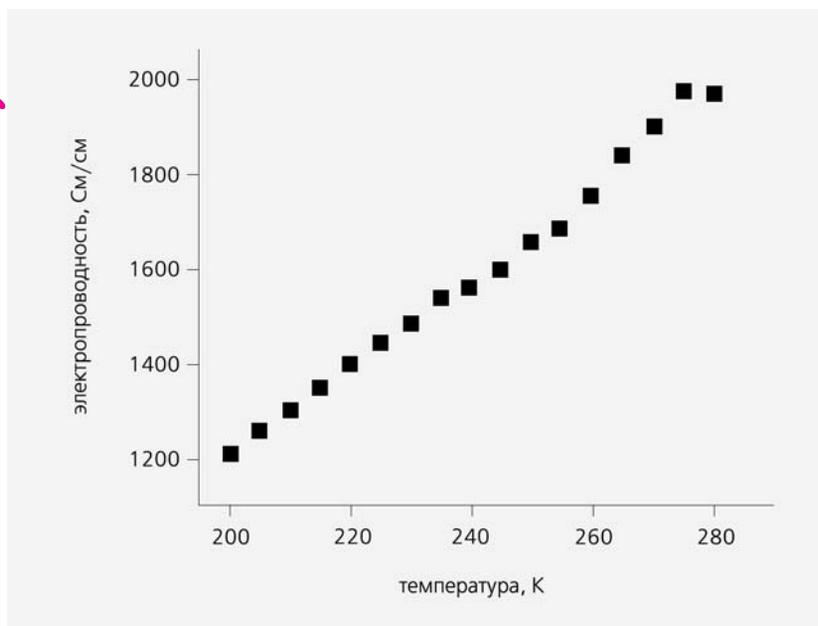
Недавно семейство углеродных материалов пополнилось еще одним представителем. Группа исследователей из нескольких американских лабораторий и их коллеги из Шанхайского университета (Китай) совместно синтезировали методом химического осаждения паров гибкие цилиндрические структуры, имеющие диаметр от 40 до 100 мкм, длину до 1 см и толщину стенок примерно 1.4 мкм<sup>2</sup>. В качестве предшественника использовали смесь этилена с парафиновым маслом. Пары этой смеси вместе с потоком аргона и водорода (94:6) подавали в камеру синтеза, где поддерживалась температура 750—850°C.

Внешняя поверхность полученных трубок покрыта частицами аморфного углерода, количество которых возрастает по мере увеличения продолжительности синтеза. С помощью сканирующего электронного микроскопа по-

<sup>2</sup> Peng H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.101. P.145501.



Использование магнитного силового микроскопа для наблюдения за отдельными магнитными вихрями в сверхпроводнике (а), манипуляция ими — «протаскивание» вихря по образцу (б) и «наматывание» одного вихря на другой (в).



Температурная зависимость коэффициента электропроводности углеродной трубки большого диаметра.

казано, что стенки трубок содержат поры в виде столбиков прямоугоньной формы, высотой 1.2 мкм и поперечником 0.5–2 мкм, которые находятся на расстоянии примерно 100 нм друг от друга. Стенки, плотность которых 116 мг/см<sup>3</sup>, имеют многослойную графитовую структуру; расстояние между слоями 0.34 нм — как у кристаллического графита и многослойных нанотрубок. Плотность материала из новых трубок равна 11 мг/см<sup>3</sup>, что соответствует плотности углеродной нанопены.

Прочность на растяжение синтезированных трубок, определенная в ходе исследований их механических свойств стандартным методом, составляет примерно 6.9 ГПа. Таким образом, даже с учетом крайне низкой плотности материала, у трубок рекордная удельная прочность: по сравнению с хлопковыми нитями она более чем на два порядка выше.

Абсолютная проводимость полученных трубок примерно на порядок больше, чем у нановолокон. Температурная зависимость их электропроводности имеет возрастающий характер — это указывает на полупроводниковую природу проводимости.

Сочетание высоких механических и электрических свойств позволяет использовать новый материал для весьма широкого круга приложений: в качестве элемента микроэлектромеханических систем, в медицине, в текстильной промышленности и т.д.

<http://perst.issp.ras.ru> (2009. Т.16. Вып.3).

### Биология

#### Вымирание медоносных пчел

Последние несколько лет в печати часто появляются сообщения о гибели семей медоносных пчел (*Apis mellifera*) в Соединенных Штатах, Европе и Японии. Осенью 2006 г. и весной 2007-го многие американские пчеловоды обнаруживали ульи, в которых отсутствовали взрослые пчелы, хотя в брошенных сотах находилось достаточно и запасов меда, и личинок. Для описания этого явления даже был предложен новый термин: «болезнь вымирания колоний» (Colony Collapse Disorder). Опубликован обстоятельный обзор потерь пчелиных семей в 16 странах Северной Америки и Европы.

Предлагалось множество различных объяснений этого явления: электромагнитное излучение, пыльца генетически модифицированных растений, паразиты и вирусы, экологические и экономические факторы, пестициды. Для их проверки проведено немало исследований. И хотя на сегодня многое остается неясным, складывается впечатление, что паразиты и вирусы — наиболее важная причина большинства случаев вымирания пчел. Эктопаразиты пчел, например клещи, которые ранее не считались опасными для пчелиных колоний, играют существенную роль как переносчики грибков и вирусов и при определенных условиях могут стать высокопатогенными.

Science. 2010. V.327. №5962. P.152 (США).

### Зоология

#### Комодский дракон ядовит

Исследователи из Австралии, Нидерландов, Швейцарии, Бельгии, Великобритании, Гонконга, США и Израиля — 28 авторов, используя самые передовые средства научного арсенала, проанализировали различные аспекты питания гигантского комодского дракона *Varanus komodoensis*, обитающего на Комодских о-вах<sup>1</sup>. Применялись трехмерное моделирование механики челюстного аппарата и магнитно-резонансная томография челюстных желез, проводился молекулярный анализ секретов этих желез.

Столь обширное комплексное исследование связано с тем, что со времени открытия этих гигантских рептилий в начале XX в. их охотничье поведение оставалось загадкой. Достигающие трехметровой длины комодские драконы могут нападать на крупных копытных (даже на буйволов), но зачастую не убивают их на месте — раненая жертва убегает, а хищники затем отыскивают ее труп.

Насчет особенностей охоты комодских варанов высказыва-  
<sup>1</sup> Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2009. V.107. №22. P.8969—8974.

лись различные гипотезы: хищные ящерицы разрывают сухожилия на конечностях жертвы и тем обездвиживают ее; наносимые ими раны приводят к летальной кровопотере; самая распространенная версия — наличие трупного яда, который вырабатывают бактерии, размножающиеся в пасти хищников. Наконец, было сделано предположение, что вараны, подобно ядовитым змеям, вырабатывают токсины. Международный коллектив ученых внес ясность в этот вопрос.

Анализ механики челюстного аппарата дракона *V.komodoensis* показал, что сила сжатия его челюстей в 6.5 раза ниже, чем у крокодила *Crocodylus porosus*, имеющего сходные размеры. Таким образом, одолеть сильную и крупную добычу только с помощью зубастой пасти варану гораздо труднее, чем крокодилу. Тем не менее это ему удастся. И, вероятно, все-таки благодаря яду.

Магнитно-резонансное исследование позволило установить, что в нижней челюсти комодского варана имеется ядовитая железа, которая состоит из крупного заднего отдела и пяти мелких передних. У каждого отдела есть собственный проток с отверстиями, открывающимися между зубами. При этом на самих зубах ядопроводящих желобков (что свойственно многим ядовитым змеям) у варана нет.

Биохимический анализ состава яда выявил присутствие в нем коагулирующих, геморрагических и вызывающих шок токсинов. Иными словами, токсический потенциал яда *V.komodoensis* такой же, как у варана *V.varius* и ядовитой змеи — тайпана *Oxyuranus microlepidotus*. Одновременно отвергается гипотеза о токсичных бактериях, попадающих в раны жертвы из полости рта дракона.

Полученные данные указывают, что челюстной аппарат комодского варана приспособлен к удержанию добычи и введению в нее яда. Интересно, что сходный механизм, вероятно, существовал и у вымершего гигантского варана *V.priscus*, которого можно считать

самым крупным (достигал семи-метровой длины) из когда-либо существовавших на Земле ядовитых пресмыкающихся.

© Д.В.Семенов,  
кандидат биологических наук  
Москва

## Физиология. Биофизика

### На пути к новым кардиопрепаратам

Как известно, передача нервных импульсов от одной возбудимой клетки к другой происходит благодаря особому рода межклеточным контактам — синапсам. В наиболее распространенных химических синапсах сигналы передаются посредством определенных веществ — медиаторов. Тот или иной медиатор выделяется в виде маленьких порций (квантов) из первой (пресинаптической) клетки и воздействует на рецепторы мембраны второй (постсинаптической). Каждый квант соответствует внутриклеточному пузырьку (везикуле), мембрана которого сливается с клеточной стенкой, а внутреннее содержимое, в том числе молекулы медиатора, выходит в щель между пресинаптической и постсинаптической клетками.

Впервые этот способ выделения медиатора, называемый квантовым, был обнаружен физиологами Б.Катцем и П.Фэттом в нервно-мышечном синапсе, за что в 1970 г. Катц получил Нобелевскую премию. Нервно-мышечный синапс образуется между окончанием аксона двигательного нейрона и мембраной скелетного мышечного волокна. Так происходит возбуждение и сокращение скелетных мышечных волокон.

В 1976 г. Катц обнаружил и другой (неквантовый) способ секреции медиатора нервно-мышечных синапсов позвоночных животных — ацетилхолина. Оказалось, что даже в отсутствие возбуждения двигательного нейрона ацетилхолин непрерывно и в большом количестве выделяется в синаптическую щель, хотя массового выброса везикул не происходит. Медиатор

«сочится» непосредственно из цитозоля пресинаптического окончания, где он, собственно, и образуется.

До недавнего времени было неясно: неквантовое выделение ацетилхолина — феномен, характерный только для нервно-мышечных синапсов, или более широко распространенное в организме явление?

Московские (Институт экспериментальной кардиологии, МГУ им.М.В.Ломоносова) и казанские (Институт биофизики и биохимии, Казанский медицинский университет) биофизики под руководством академика Л.В.Розенштрауха и члена-корреспондента Е.Е.Никольского экспериментально доказали, что неквантовое высвобождение ацетилхолина происходит не только в скелетных мышцах, но и в сердце. Выделяется медиатор из окончаний нейронов парасимпатической нервной системы, расположенных в стенке предсердия. До проведенных исследований было известно, что эти нейроны сердца выбрасывают везикулы с ацетилхолином, возбуждаясь в ответ на сигналы, которые приходят от парасимпатических нейронов, расположенных в продолговатом мозге. Теперь ясно, что и в состоянии покоя постганглионарные нейроны выделяют ацетилхолин, который накапливается в миокарде в условиях блокады фермента (ацетилхолинэстеразы), расщепляющего ацетилхолин.

Неквантовый способ выделения этого нейромедиатора в покое из постганглионарных окончаний был доказан с использованием различных методических приемов. Кроме того, ученым впервые удалось установить, что самый распространенный в организме фермент ацетилхолинэстераза обладает тканевой специфичностью. Это открывает новый раздел в фармакологии — позволяет создавать тканеспецифичные (например, кардиоселективные) блокаторы ацетилхолинэстеразы.

Experimental Physiology. 2010. V.95. №2. P.265–273;  
Journal of Cardiovascular Pharmacology. 2009. V.53. №2. P.162–166 (Великобритания).

**Геология**

**Угледородный потенциал отложений Южного Сахалина**

При бурении на юго-западе Сахалина в скважинах обнаружены многочисленные притоки нефти и жирного газа из кайнозойских отложений, в которых содержатся прослой угля. Это свидетельствует о способности органического вещества генерировать в условиях катагенеза значительное количество жидких углеводородов. В работе Е.В.Грецкой (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск) и М.В.Дахнова (Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, Москва) приводятся новые геохимические данные об исходном угледородном потенциале угленосных толщ Южного Сахалина.

В кайнозойском разрезе этого региона существуют две угленосных толщи: палеогеновая (найбути́нская свита) и нижнемиоценовая (верхнедуйская свита). Прослой торфа и обогащенные органическим веществом глины встречаются также в четвертичных отложениях, которые образуют низкие морские террасы. Палеогеновые и нижнемиоценовые угленосные отложения накапливались в эпохи климатических оптимумов и относительно низкого уровня моря.

Авторы изучили разновозрастные угли и углистые аргиллиты, преобразованные до градаций позднего протокатагенеза — начального мезокатагенеза. Найбу́тинская свита (палеоген(?)) — средний эоцен), расположенная в пределах Южного Сахалина, имеет разное строение и толщину. Так, в Холмско-Невельском районе она при общей мощности 1150 м расчленяется на пять толщ, содержащих прослой углистых аргиллитов и углей; в районе поселков Синегорск и Быков мощность свиты 370—400 м, и она подразделяется на три части, а угольные пласты приурочены к средней. Угленосные толщи этой свиты формировались в условиях заболоченных реч-

ных пойм, приозерных и прибрежных болот и лагун. На этой территории общее замещение континентальных отложений прибрежно-морскими и морскими осадками в целом происходит к югу и с востока на запад.

Верхнедуйская свита Угледорского и Макаровского районов имеет сходное строение, но различается по мощности (425—1100 м) и числу рабочих пластов (до 15 в Угледорском районе). Толщина основных рабочих пластов от 0.3 до 1.5—5 м. В нижней и верхней части свиты среди песчаников, алевролитов и аргиллитов встречаются линзы и прослой угля и углистых аргиллитов (1—30 м). Отложения верхнедуйской свиты накапливались в разнообразных озерно-болотных и лагунных обстановках, в континентальных и прибрежно-морских условиях.

В настоящее время угольное вещество в качестве источника промышленных скоплений нефти рассматривается в нефтегазоносных бассейнах Индонезии, Китая, Танзании, Северного моря и др. Источником некоторых видов нефти считаются также угли и углистые породы Анадырского и Западно-Камчатского бассейнов.

Тезисы докладов XVIII Международной конференции (школы) по морской геологии. Москва, 16—20 ноября 2009 г. Т. II. С. 42—43.

**Климатология**

**О чем говорят пещерные натёки на Майорке**

Уровень Мирового океана и климат тесно связаны друг с другом, а следовательно, реконструкция уровня моря в прошлом позволяет уточнить характер климата минувших эпох, понять механизмы климатических изменений.

Группа американских ученых изучала кристаллы кальцита, образовавшиеся на сталактитах и сталагмитах в затопляемых прибрежных пещерах на о.Майорка. Отложения формируются лишь на тех частях натечных образований, которые оказываются под водой и, значит, маркируют меняющийся уровень воды.

Для определения возраста выросших кристаллов исследователи использовали радиоизотопную датировку уран-ториевым методом и получили возраст 81 тыс. лет для максимального уровня воды. Этот уровень оказался на 1 м выше современного. Отсюда следует, что в период, относящийся к последней ледниковой эпохе, объем льда в наземных ледниках был приблизительно равен современному. Однако такой вывод противоречит преобладающему на сегодня мнению, что в то геологическое время наземные ледники покрывали намного большую площадь, чем ныне. Для разрешения этого парадокса необходимы дальнейшие исследования пещерных натёков в других тектонически стабильных районах мира.

Science. 2010 V.327. №5967. P.860—863 (США).

**Палеогеография**

**Колебания уровня Аральского моря**

Исследования геологического прошлого Аральского моря, проведенные в XX в., свидетельствуют о колебаниях его уровня на протяжении последних 6 тыс. лет. Около 100 коротких (до 4.5 м) кернов, поднятых в 1978—1980 гг., дали материал для литологических, микропалеонтологических исследований и радиоуглеродного анализа. Однако полученные даты — в основном по пробам карбонатного или органического вещества — оказались слишком трудными для интерпретации. Новый этап исследований был начат проектом «CLIMAN», поддержанным независимой международной ассоциацией «ИНТАС — Аральское море (2002—2005)». Его результаты позволили довольно определенно реконструировать историю растительности и климата этого региона, изменения в экосистеме и уровне Аральского моря за последние 2 тыс. лет. Между тем в реконструкциях разных авторов на графиках выявляется несовпадение хода кривых с недавно открытой и археологически датирован-

ной средневековой регрессией Кердери. Таким образом, известная часть истории Арала простирается не столь уж далеко назад, а хронология событий недостаточно надежна.

На решение существующих проблем нацелен проект «История Аральского моря за последние 10 000 лет: природный и антропогенный компоненты» (руководители С.К.Кривоногов и Дж.Бурр, 2008—2010 гг.). Этот проект поддерживают Российский фонд фундаментальных исследований и Американский фонд гражданских исследований и развития. В его рамках предполагается восстановить динамику уровня Арала, миграцию рек Сырдарьи и Амударьи, заложить профили ручного бурения через сухое дно моря. В настоящее время изучаются керны скважин, полученные в 2003—2008 гг.

Сопоставление вскрытых скважинами отложений показывает существенные перерывы в накоплении осадков, отражающие регрессии моря ниже отметок в местах бурения. Достоверную информацию о недавних изменениях предоставляют археологические исследования. Найденные на дне Арала поселения и мазары (культурные сооружения) Кердери располагаются в 65 км западнее бывшей береговой линии, и во время максимума последней трансгрессии они находились на глубине около 20 м. Возраст этих археологических памятников относится к XIV в. На космических снимках сухого дна Арала в районе поселений видны русло и дельта средневековой Сырдарьи, по которой глубина регрессии определяется в 29—30 м над ур.м. Летописи тоже отражают средневековую регрессию и последующее повышение уровня начиная с конца XVI в. На максимум последней трансгрессии указывает рабат (укрепленный лагерь) Пулджай, который существовал на южном краю залива Лаудан в I—V и XII—XIV вв. Развалины рабата на отметках около 55 м густо усыпаны створками раковин. Вероятно, люди ушли оттуда в связи с исчезновением воды. В котловине Караумбет (бывший

залив Ак-Чеганак) прибрежные отложения с раковинами отмечены на отметках 47.5 и 46 м, что соответствует двум временным диапазонам — менее 150 и 1450 календарных лет назад.

По озерным отложениям, археологическим и историографическим данным надежно установлены следующие изменения уровня Аральского моря:

- современная антропогенная регрессия 0—50 лет назад (от 2000 г.) — 28 м (понижение продолжается);
- новоаральская трансгрессия 50—400 лет назад — 55 м;
- регрессия Кердери 400—900 лет назад — 29—30 м;
- средние уровни моря 900—1350 лет и древнее — 47—42 м;
- событие Караумбет-1 1400 лет назад — 46 м и выше;
- береговой бар 4500 лет назад — 40 м;
- глубоководная фаза 4500—5200 лет назад — более 40 м;
- прибрежные пески 5200—5900 лет назад — 42—44 м;
- глубоководная фаза — порядка 20 тыс. лет назад.

Таким образом, за последние 5900 лет уровень Аральского моря изменялся как минимум восемь раз (современное его положение минимальное), события древнее этого времени еще не датированы.

Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 19—23 октября 2009 г. С.298—301.

## Климатология

### Реакция вечной мерзлоты на потепление

С начала 1960-х годов, когда возникла проблема глобального потепления, особую актуальность в мерзлотоведении приобрело изучение реакции криолитозоны (вечной мерзлоты) на климатические изменения. В.Н.Конищев (Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова) отмечает, что в разработанных прогнозных моделях изменения криолитозоны в течение XXI в. недостаточно учтена специфика теплообмена толщи многолетней

мерзлоты с внешней средой. Все внешние воздействия на многолетнюю мерзлоту осуществляются через систему покровов (растительного, почвенного, деятельного слоев), иначе говоря, через ландшафт и его компоненты. Интенсивность их влияния усиливается, когда происходят направленные изменения климата (повышение среднегодовой, летней или зимней температуры воздуха), что ведет и к изменениям в других компонентах природной среды. В ответ на их совокупное воздействие свойства мерзлой толщи меняются. В итоге возникают обратные связи (положительные и отрицательные), в результате чего мерзлые толщи реагируют на колебания температуры воздуха не только с разной интенсивностью, но в ряде случаев неоднозначно. Многие процессы, лежащие в основе этих связей, еще не изучены.

Изменение условий на поверхности, сопровождающее потепление или похолодание, может сильно трансформировать направленность мерзлотного процесса, вплоть до противоположной тому, что происходит на поверхности. В последние десятилетия стало известно о повышении температуры вечной мерзлоты на глубине нулевых годовых амплитуд в самых разных регионах криолитозоны — на Аляске и Тянь-Шане, на севере Канады, Скандинавии, европейской части России и Западной Сибири, на плато Тибет и в Монголии. Основная причина — повышение среднегодовой температуры воздуха, а также изменение толщины снежного покрова. В районе Чульманской впадины (Алданский щит) в 23% скважин до глубины 40 м зафиксировано повышение температуры на 0.1—0.3°C. В большинстве скважин, расположенных в ненарушенных природных условиях, на глубине 20—50 м сохранился квазистационарный тепловой режим, не отреагировавший на повышение среднегодовой температуры воздуха за последние 20 лет, а в долинах рек на мелкобугристых участках в ряде случаев до глубины 20—40 м наблюдается понижение температу-

ры вечной мерзлоты на 0.1°C. Причина таких различий заключается, по мнению автора, в том, что в подчиненных ландшафтах в ответ на потепление климата развиваются защитные реакции: повышение влажности почв, интенсивный рост влаголюбивой растительности и т.п. Неясно, насколько такая закономерность проявляется в разных районах, но для зоны прерывистой мерзлоты (на минеральном субстрате) это ландшафтное различие в реакции вечной мерзлоты на потепление климата должно быть характерным.

Своеобразна реакция многолетней мерзлоты на современное потепление пятнистой тундры: за последние 20 лет температуры поверхности почвы и многолетней мерзлоты на глубине 0.7 м заметно повысились, но при этом мощность сезонного оттаивания уменьшилась.

В центральной Якутии защитный слой многолетней мерзлоты, который залегает ниже слоя сезонного оттаивания и над толщей погребенного льда (поверхности плейстоценовых полигонально-жильных льдов), не тает в том случае, когда находится под густым лесом, но стоит его уничтожить, как защитный слой начинает таять, а толщина слоя сезонного оттаивания вырастает на 30–40%. Защитный слой возник здесь в результате повышения температуры многолетней мерзлоты на рубеже плейстоцена и голоцена с минус 22–28 до минус 8–10°C, когда стала возможной миграция влаги из седиментационного слоя в подстилающий мерзлый грунт. На севере Якутии защитный слой отличается очень большой льдистостью (до 60–70%), а его мощность достигает 1.5–1.7 м. Благодаря этому слою значительная часть ледового комплекса сохранялась на протяжении 10 тыс. лет и сейчас во многом определяет ландшафтно-мерзлотные и геоэкологические условия на огромной территории Восточной Сибири.

Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 19–23 октября 2009 г. С.281–284.

## Палеогеография

### Как быстро «бегают» деревья?

Со школьной скамьи известно, что для растительности характерна широтная зональность: на севере — тундра, южнее — леса, потом — степи, к югу от них — пустыни, а к северу от тундры — тоже пустыни, только арктические. Известно также, что 4–5 тыс. лет назад расположение растительных зон было иным, особенно резко оно менялось в связи с оледенениями. На этапе перехода от оледенений к межледниковьям растительные зоны перемещались на многие сотни километров к северу.

В лесу деревья входят в состав биоценоза и сосуществуют вместе с другими растениями, грибами, бактериями и т.д. Означает ли это, что при смещении растительной зоны все ее составные части дружными рядами перемещаются на юг или на север? Вовсе нет. Хотя растительная зона сдвигается вроде бы вся целиком, однако в пределах самой зоны одни растения перемещаются быстрее, другие вроде бы отстают, но в конечном итоге зона перемещается как единое целое. Переход из подзоны в подзону (а иногда и с выходом из зоны) учесть очень трудно, порой нелегко даже заметить. Тем не менее на примере деревьев передвижение, упреждающее смещение всей зоны, удается уловить, в особенности когда это происходит в первой половине межледниковья.

Наиболее яркие примеры перемещения отдельных древесных пород можно найти на севере Восточно-Европейской равнины. Так, недавно Л.А.Савельева<sup>1</sup> (Санкт-Петербургский государственный университет) в своих исследованиях показала, что ель от Вологодской обл., где она появилась 10 тыс. лет назад, продвигалась со скоростью 700 м/год, а в районе самого перешейка — 60–80 м/год; в северном Прионе-

жье скорость составляла 30–40 м/год, а от южного берега Кольского п-ова до его северного берега — 50–60 м/год.

Недавние результаты исследований А.А.Чепурной (Институт географии РАН) касаются скорости передвижения широколиственных пород (дуба, вяза, липы и граба) в первой половине микулинского межледниковья и тоже на севере Восточно-Европейской равнины<sup>2</sup>. На основе анализа 12 спорово-пыльцевых диаграмм было установлено, что порядок появления пыльцы меняется от региона к региону. Если в разрезах южной Прибалтики пыльца отмечена в последовательности: вяз, дуб, липа, граб, то по направлению к северу и северо-востоку порядок меняется. Более раннее появление пыльцы граба относительно кривых пыльцы дуба и вяза в разрезах центральных и северных регионов говорит о том, что миграционная волна граба догоняла миграционную волну дуба. Это позволило оценить вероятную скорость миграции широколиственных пород в первую половину микулинского межледниковья. Граб от бассейна Немана до устья Северной Двины и Мезени двигался со скоростью 530–640 м/год, а дуб — до Рыбинска — со скоростью 250–280 м/год. В фазу преобладания дуба зона широколиственных лесов переместилась на 600 км, а в фазу максимума граба — на 800 км севернее современного ее положения. В тот период зона тундры и лесотундры отсутствовала, она появилась севернее 66–67°с.ш. после оптимума микулинского межледниковья.

Из скоростей передвижения ели и широколиственных пород может быть сделан вывод, что дуб и граб на севере Восточно-Европейской равнины вначале позднего плейстоцена и голоцена были в разы мобильнее ели.

© С.А.Лаухин,

доктор геолого-минералогических наук  
Москва

<sup>1</sup> Савельева Л.А. Динамика расселения ели на северо-западе Русской равнины в голоцене // Палинология. Теория и практика. М., 2005. С.232–233.

<sup>2</sup> Фундаментальные проблемы квартала: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Новосибирск, 2009. С.616–619.

# «Мир зверей — самое прекрасное, что существует на Земле...»

А.М.Гиляров,

доктор биологических наук

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Слова в заголовке принадлежат Владимиру Моисеевичу Смирину (1931–1989), зоологу и анималисту, рисунки которого стали основой двух книг, выпущенных в свет издательством Центра охраны дикой природы. О них невозможно рассказать, не отдав сначала должное Владимиру Моисеевичу.

В самой натуре Смирин, необычайно талантливый человек, не совмещались, а были слиты воедино дар зоолога и дар художника. Наблюдение за животными и их рисование было для него не просто любимым занятием, а призванием, причем всепоглощающим. Это не всегда понимали те, с кем Вадим (а именно так предпочитал себя называть Владимир Моисеевич) приходилось сталкиваться. Такое призвание вообще не очень вписывалось в реалии бытия научного работника, что, возможно, отчасти и послужило причиной его раннего ухода из жизни.

Рисование зверей было для Вадима Смирин способом их познания — не чисто зоологического, не чисто художественного, а какого-то другого, более высокого, которому трудно подобрать точное определение. Ясно только, что познание это оказалось в высшей степени продуктивным: результаты его теперь в какой-то степени становятся доступными и нам, когда мы погружаемся в рассмотрение сделанных Смириным рисунков в двух вышедших книгах. Впрочем, так ли уж велика разница между трудом ученого

и трудом художника? Ведь и тот и другой нацелены на выявление некоторых принципов устройства окружающего мира, некой структуры, которая в изучаемом (изображаемом) объекте главная. При этом художник (как и ученый) должен уметь абстрагироваться от второстепенного, от деталей, которые мешают восприятию главного. На самом деле мы все это и так прекрасно видим на примере рисунков Леонардо да Винчи, Рубенса, Ватто, Пикассо... (у каждого читателя может быть свой список).

Но всегда ли мы осознаем, что аналогичная задача — выделять главное и отбрасывать второстепенное — стоит и перед художником, готовящим иллюстрации к научным трудам по зоологии или ботанике? Видимо, не всегда, хотя биологи прекрасно знают: ни один определитель, даже самый современный, немыслим без хороших рисунков. Фотография может в лучшем случае только дополнить, но не заменить рисунок. В отличие от объектива фотоаппарата глаз художника, рассматривающего (считай — изучающего) определенный объект, оказывается строго избирательным.

Зоологическая иллюстрация как особый вид прикладного искусства претерпела серьезную эволюцию. Достаточно взглянуть на гравюры Ж.Бюффона из «Естественной истории». Сейчас мы воспринимаем их как очень милые и забавные, но все же не более чем курьезы. Порой даже создается впечатление, что фигурируют на них не живые звери



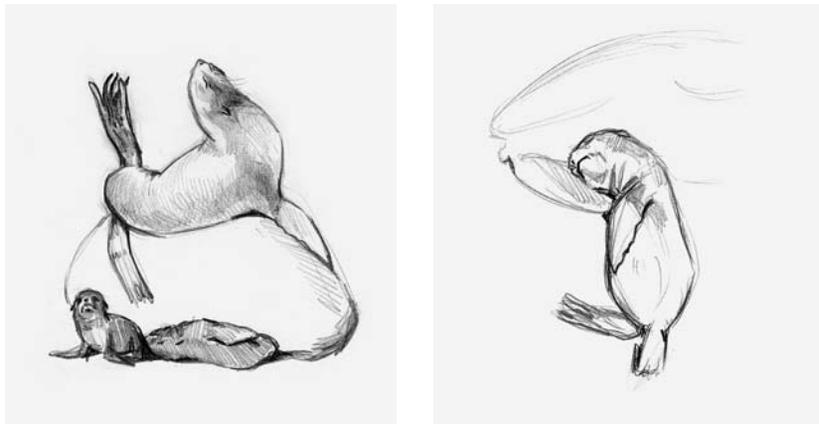
**В.М.Смирин.** ПОРТРЕТЫ ЗВЕРЕЙ КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ. Сост.: А.И.Олексенко, А.В.Зименко, Е.В.Зубчанинова.

М.: Центр охраны дикой природы, 2007. 60 с., ил.

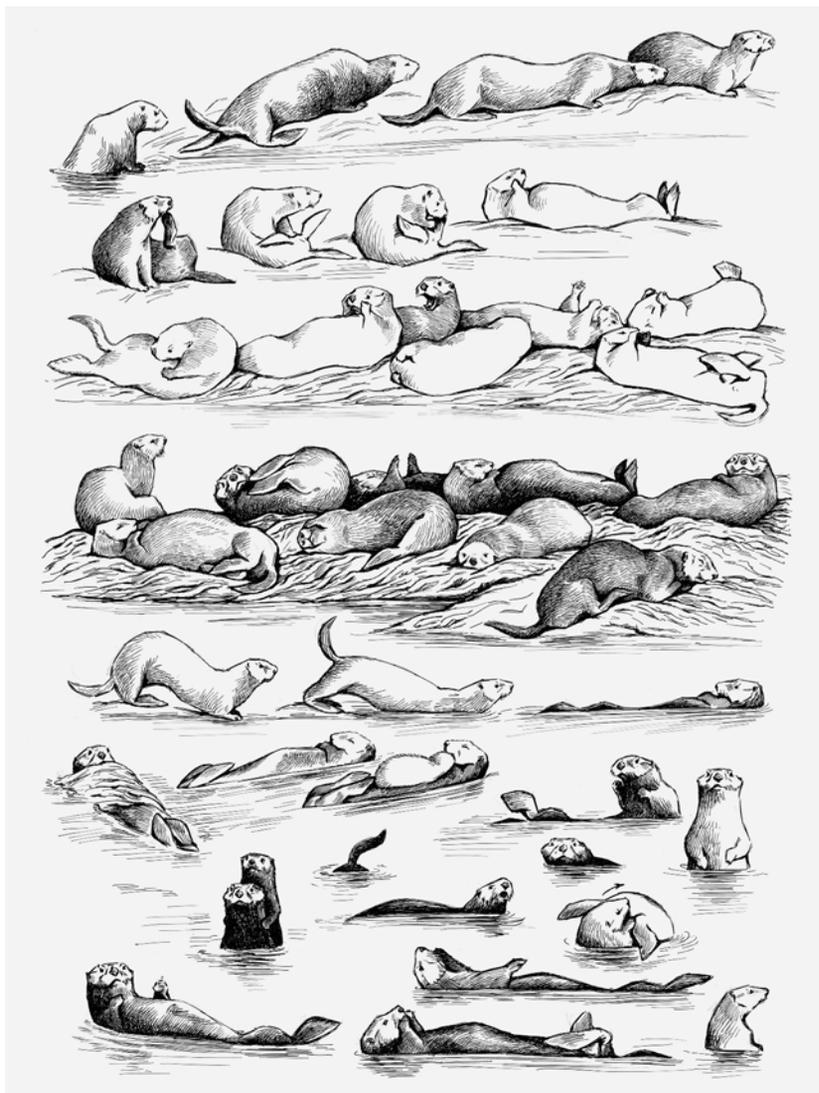


**В.М.Смирин.** ПОРТРЕТЫ СТЕПНЫХ ЗВЕРЕЙ ЕВРОПЫ И СЕВЕРНОЙ АЗИИ. Сост.: А.И.Олексенко, А.В.Зименко, П.П.Дмитриев, Е.В.Зубчанинова.

М.: Центр охраны дикой природы, 2008. 92 с., ил.



Самка северного морского котика с потомством и спящий, раздувшийся от выпитого молока детеныш. Самка забралась на камень и обмахивается ластом от жары, а котята лежат на земле. Остров Беринга, северо-западное лежбище. Все рисунки из семейного архива Смириных



Поведение каланов на залежке и на воде.

и птицы, а их чучела, причем плохо сделанные. Невольно вспомнилось, как однажды Вадим Смирин рассказывал на биологическом факультете о зоологической иллюстрации. Речь зашла о трудностях, возникающих в тех случаях, когда необходимо изобразить зверя, которого художник не мог видеть живьем. В ответ на кем-то заданный вопрос «А можно ли рисовать с чучел?» Вадим не сказал, а воскликнул: «Нет природы более мертвой, чем чучело!» А потом добавил: «Скелеты гораздо более живые». Очень меткое, на мой взгляд, замечание, а для зоолога — так просто очевидное.

Иллюстрации в старых изданиях «Жизни животных» Брема (а их в детстве Смирин не раз копировал) представляют уже значительный шаг вперед в сравнении с бюфоновскими. Но и эти рисунки, к сожалению, очень статичны (даже когда художник стремится передать движение), отягощены тяжелой графической штриховкой и зачастую дают лишь приблизительное представление о том, как в действительности выглядит то или иное животное.

К счастью, ситуация с зоологической иллюстрацией стала быстро меняться в XX в. В России такие художники-анималисты, как А.Н.Комаров, В.А.Ватагин, А.Н.Формозов, Н.Н.Кондаков, основывают свои рисунки на тщательном наблюдении за животными в зоопарках, а нередко — и непосредственно в природе. На их иллюстрациях мы видим уже живых зверей, птиц, пресмыкающихся, земноводных и других животных. Зоологическая точность и художественное видение объекта, как это ни удивительно, вовсе не противоречат друг другу. Именно эта традиция и нашла свое непосредственное продолжение в работах Смиринна.

Рисовать зверей он начал еще в школьные годы, в зоопарке Ташкента (в этом городе семья находилась в эвакуации во время войны), и продолжил уже

в Москве. Занимаясь в кружке юных биологов при Московском зоопарке (КЮБЗе), одновременно учился в художественной школе. В 1949 г. поступил на биолого-почвенный факультет МГУ, а окончив его, по распределению был направлен в Северный Казахстан, где работал в системе противочумной защиты (ведь переносчики чумной бактерии, блохи, живут на грызунах — больших песчанках). В конце 1960 г. Смирин поступил в аспирантуру кафедры зоологии позвоночных биофака МГУ, некоторое время работал в Институте эпидемиологии и микробиологии им.Н.Ф.Гамалеи АМН СССР, защитил кандидатскую диссертацию, а с 1967-го стал сотрудником той кафедры, где прежде был аспирантом, и проработал там до конца жизни.

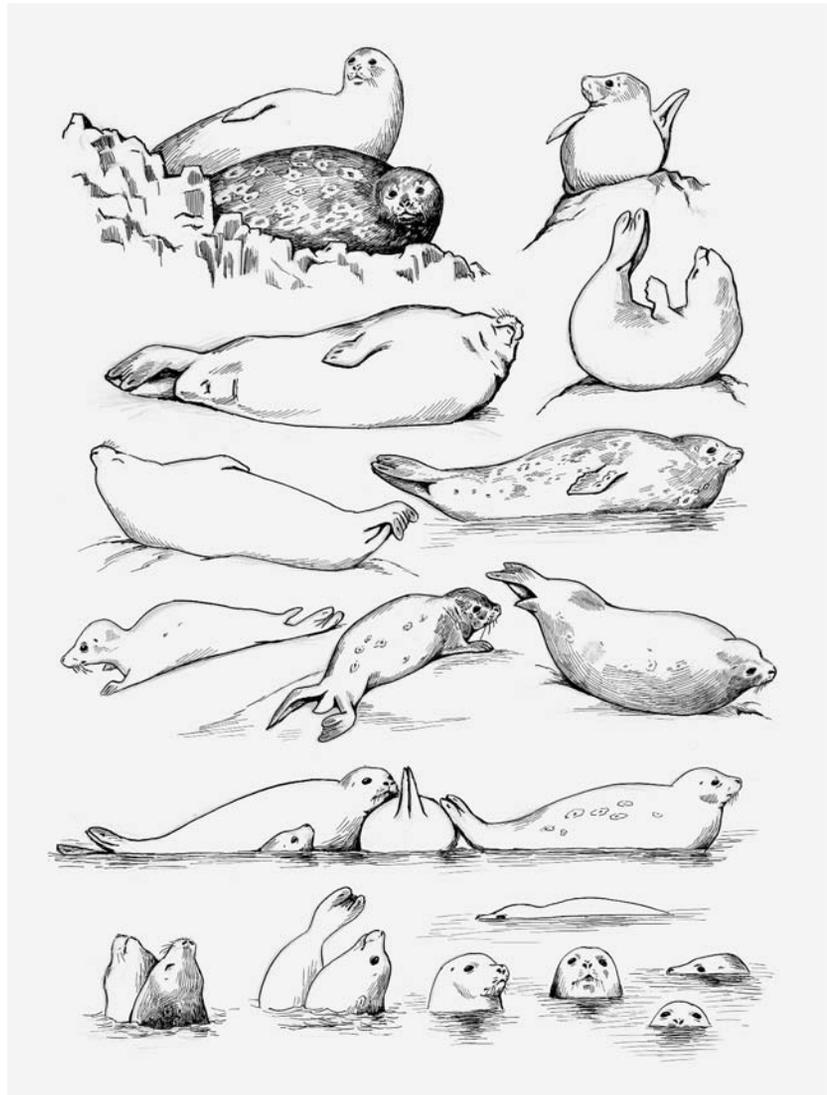
Огромное влияние на подход Смирин к рисованию животных оказали два человека, которых он считал своими учителями. Это Александр Николаевич Формозов (1899—1973) — известный зоолог, эколог и вместе с тем прекрасный художник-анималист (не лишенный к тому же и писательского дара), и Василий Алексеевич Ватагин (1884—1969) — выдающийся художник и скульптор (получивший, однако, естественнонаучное образование). В России XX в. он — безусловно анималист номер один. Вслед за Ватагиным Смирин стал применять метод, которым, впрочем, пользовались и многие другие анималисты. Наблюдая за животным, обычно вовсе не остающимся неподвижным, художник делает серию последовательных набросков, стараясь ухватить ту или иную позу или характерное движение. Постепенно весь лист покрывается рисунками: некоторые всего в несколько линий, другие — с большим или меньшим числом прорисованных деталей. Фактически во время такого рисования художник изучает натуру, постепенно приближаясь

к пониманию того, как она устроена и какая в ней заложена динамика. Вадим Смирин, достигнув такого понимания, говорил, что он сумел «распечатать» зверя.

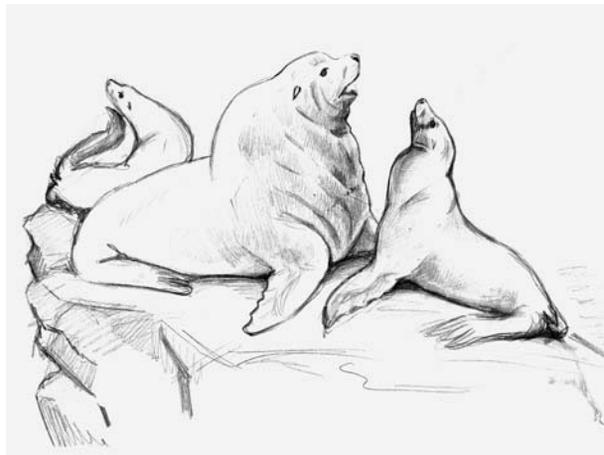
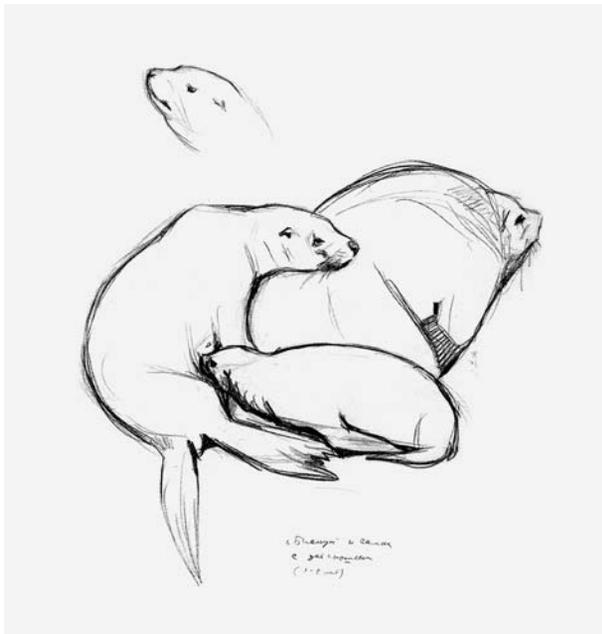
Мечтой Смирин было создание рисованного атласа зверей Европы и Северной Азии. С натуры он нарисовал почти 300 видов, причем во многих случаях это целые серии живых набросков, изображающих элементы поведения зверей и их характерные позы, а также этапы развития детенышей. Некоторые из этих рисунков и сопровождающий их текст публиковались Смириним и на стра-

ницах «Природы»\*. (Смирин любил старый — черно-белый, большого формата — вариант «Природы». На ее страницах четкие, графические рисунки хорошо выглядели, несмотря на

\* См., напр.: Смирин В.М., Орлов О.Ю. Сигнализация и ориентация у грызунов (1971. №5. С.84—88); Смирин В.М., Горелов Ю.К. Джейран в Средней Азии (1976. №2. С.112—117); Смирин В.М., Потова-Бондаренко Е.Д. Летяга и ее «парашют» (1977. №5. С.42—47); Смирин В.М., Смирин Ю.М. Моржи на Аракамченском лежбище (1980. №5. С.90—95). Рисунками Смирин оформлены статьи: Барабаи-Никифоров И.И. Русская выхухоль — реликт, эндемик нашей фауны (1975. №3. С.50—57); Терновский Д.Б. Исчезнет ли европейская норка? (1975. №11. С.54—58).



Формы активности антура (островного тюленя) на суше и на воде.



Могучий секач в окружении самок — более изящных и легких, чем хозяин гарема.

Семья сивучей: секач, самка и детеныш, сосущий мать.  
(П-ов Шипунский, 23.06.1973.)

очень неважного качества бумагу.) К сожалению, в силу ряда обстоятельств закончить работу над атласом Смирину не удалось. Результаты его поистине титанического труда (около 4 тыс. листов рисунков) остались в многочисленных папках, доступа к которым практически не было.

Только недавно у наследников, учеников и коллег Вадима Смириня появилась возможность начать публикацию его работ. В конце 2007 г. в Государственном Дарвиновском музее открылась замечательная, посвященная Смирину выставка под названием: «Он рисовал, как

дышал...». И тогда же состоялась презентация книги «Портреты зверей Командорских островов». А в ноябре 2009 г. на биологическом факультете МГУ прошло собравшее огромную аудиторию заседание памяти Смириня. Помимо выступлений людей, близко знавших Вадима Моисеевича, выступлений порой столь волнующих, что у многих на глазах стояли слезы, на этом же заседании была показана (и всем пришедшим подарена!) только что вышедшая книга «Портреты степных зверей Европы и Северной Азии», продолжающая серию, начатую «командорской» книжкой.

Обе эти книги, прекрасно изданные в одном формате, соответствуют единому художественному, а точнее — концептуальному, замыслу (авторы концепции А.И.Олексенко и А.В.Зименко; художественное оформление — Елена Мокеева). Замысел (надеюсь, что я понял его правильно) заключается в том, чтобы показать саму суть подхода Вадима Смириня к изображению животных, раскрыть, как, наблюдая за зверем и создавая множество набросков, художник постепенно постигает его облик. Кстати сказать, очень удачно составители использовали

в названиях обеих книг слово «портрет». Это действительно «портреты видов», хотя и индивидуальность каждой конкретной особи Смирин всегда отражал очень точно\*. Об этом в один голос говорят многие близко знавшие его люди. Очевидно, что и изображенный на обложке «командорской» книжки детеныш морского котика («черненький», как называют их на профессиональном жаргоне), и фигурирующий на обложке «степной» книжки детеныш обыкновенного хомяка — это совершенно конкретные звери, а не обобщенные образы.

Внимательно рассматривая обсуждаемые книги, будто видишь сам процесс работы художника-натуралиста. При этом, казалось бы, промежуточные результаты процесса на самом деле часто оставляют куда более сильное впечатление, чем конечный результат — «парадный» портрет зверя как представителя вида. Впрочем, может, этому во все и не стоит удивляться. На эскизах Рубенса, вьюшенных в небольшом зале «Старой Пинакотеки» в Мюнхене, гораздо убе-

\* Кроме того, под каждым сделанным в природе наброском Смирин ставил обычно точную дату и указывал место, где сделан рисунок.



Степной сурик (байбак).  
Так он обычно идет к предмету, которым заинтересовался, но все же опасается.

дательнее выглядит вся мощь таланта художника, чем на висящих в соседнем зале больших «готовых» полотнах.

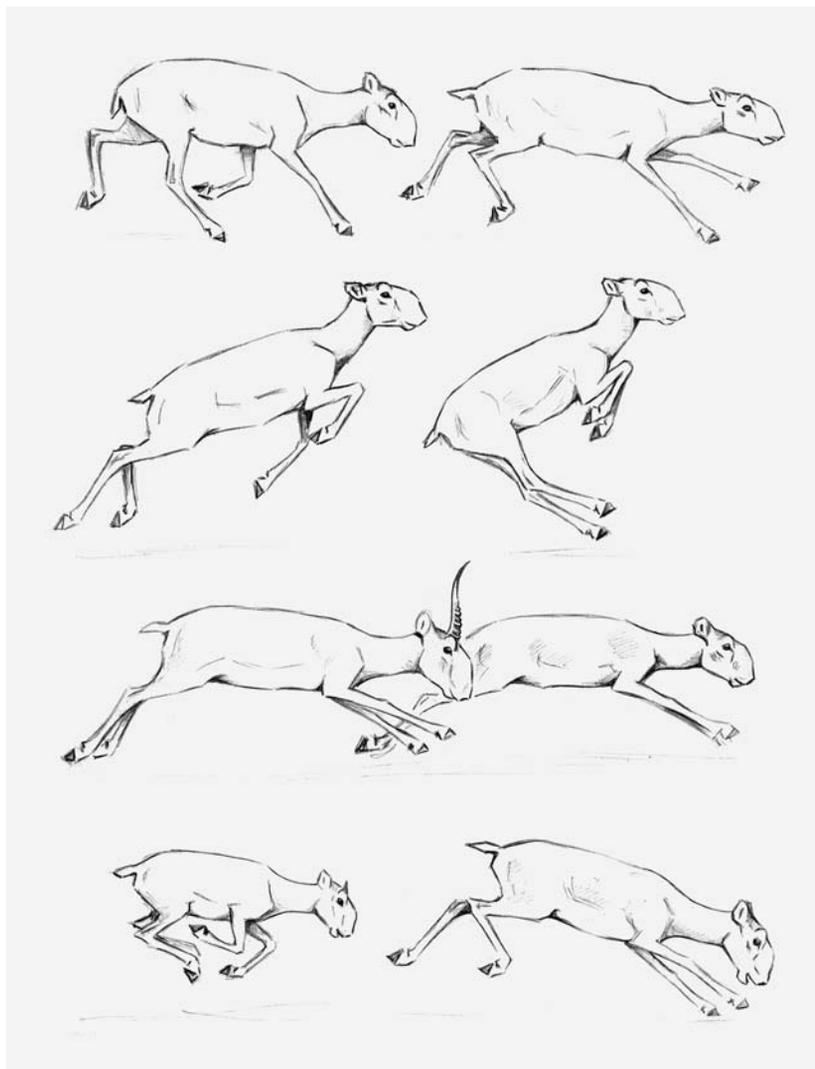
И в «командорской» книжке, и в «Портретах степных зверей» главное — это, конечно, рисунки Смирин. Но кроме них есть и тексты — небольшие очерки, посвященные биологии отдельных видов. Только один из этих очерков — о северном морском котике — написан самим Вадимом Моисеевичем как пример текста для задуманного атласа. Все остальные подготовлены его коллегами и учениками. Так, в книге о командорских зверях очерк о медновском песце (подвиде *Alopex lagopus semenovi*, обитающем на острове Медный) написан Е.П.Крученковой, о калане — А.В.Зименко, о сивуче и островном тюлене (антуре) — Т.Ю.Лисицыной (ею же дополнен смиринский очерк о котике). Поскольку в каждом очерке должен быть некий обязательный перечень сведений о виде — распространении, особенностях образа жизни, размножении, социальной структуре, мерах по сохранению, — тексты порой носят несколько формальный характер. Но надо отдать должное авторам — они старались сделать рассказы более интересными и теснее связанными с работами Смирин.

Замечательно оживляют обе книги «маргиналии» — заметки и рисунки, помещенные на полях. Часто — это отрывки из писем Вадима Моисеевича жене, Екатерине Владимировне Зубчаниновой, и другим близким, высказывания коллег, небольшие фрагменты из его книги «Звери в природе» (1991 г.), написанной вместе с братом Юрием Моисеевичем, тоже зоологом и художником, наброски животных, а то и растений. В «командорской» книжке фигурируют и вырезанные Вадимом Моисеевичем силуэты людей, с которыми он общался на островах: зоолога и фотографа С.В.Маракова; кинооператора, автора замечательных фильмов о животных —

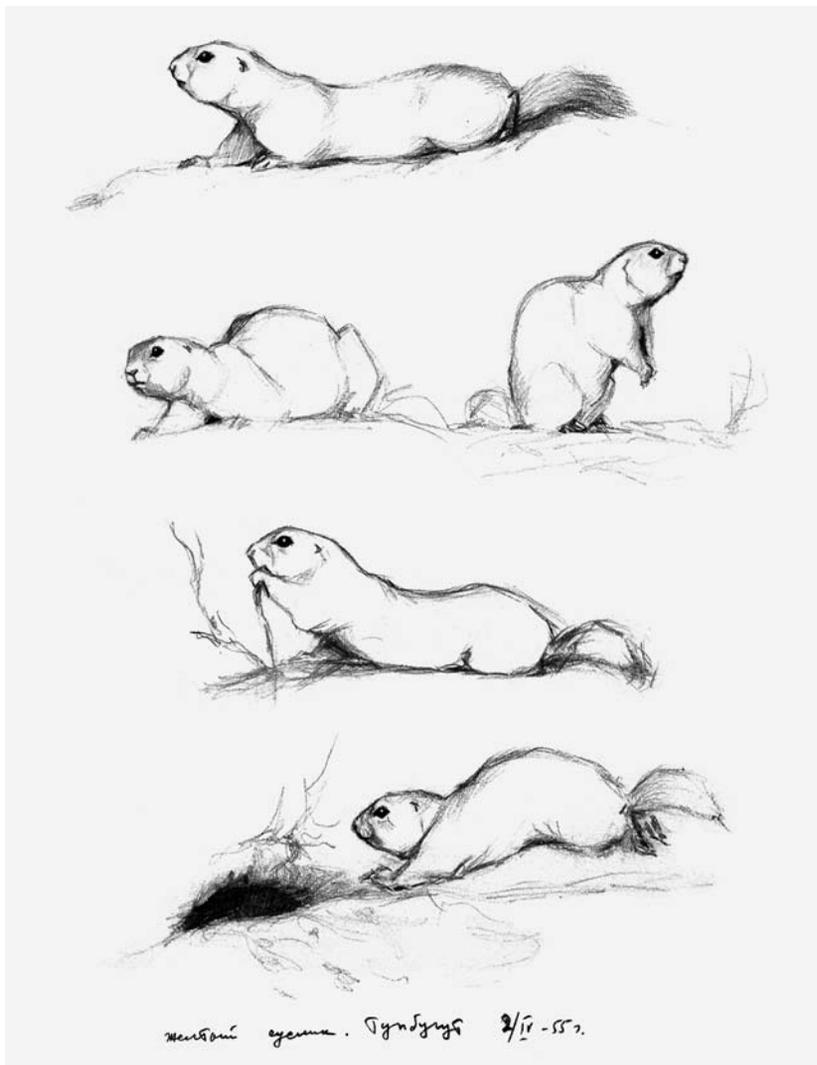
Ю.М.Ледина и его жены и неизменной помощницы Л.П.Лединой; зоолога Т.Ю.Лисицыной. Очень забавно выглядит силуэт Елены Павловны Крученковой: в валенках и вязаной шапочке, с блокнотом на коленях она сидит на высоком табурете. Здесь же силуэты двух молодых песцов, за которыми она наблюдает. А контраст к образу Елены Павловны — силуэт начальника Командорской экспедиции, тогда совсем еще молодого человека, Михаила Ефимовича Гольцмана: он стоит за кафедрой в аудитории и говорит, видимо, что-то ответственное. И Крученкова, и Гольцман — видные специалисты по поведению животных,

давно уже доктора наук, коллеги Смирин по кафедре.

Вырезание силуэтов людей (но не рисование их!) было для Смирин своего рода хобби. Интерес к этому занятию возник у него еще в детстве. В зоопарке, куда Вадим регулярно ходил рисовать зверей, он наблюдал иногда за работой одного профессионального вырезальщика силуэтов. У него он даже научился некоторым приемам, хотя признавал, что не мог достичь того мастерства, с которым профессионал вырезал всякие аксессуары — отложные воротнички на женских платьях или детали фуражек военных. Обо всем этом Вадим Моисеевич рассказывал



Бег и прыжки сайгаков.



Самка желтого суслика с детенышем, стоящие столбиком возле норы. Суслики принимают эту позу при опасности и чтобы высматривать конкурентов. Самки бывают особенно настороженны, когда впервые выводят детенышей на поверхность. Сами детеныши копируют позу матери, иногда даже не покидая отверстия норы.

Элементы поведения желтого суслика.

на биофаке много лет спустя на своего рода мастер-классах по вырезанию силуэтов.

Интересно, что когда Смирин рисовал с натуры зверей, он непрерывно будто кивал головой — смотрел на зверя, потом быстро на лист бумаги, снова бросал взгляд на зверя и опять на бумагу. Но когда он вырезал силуэты (а это почти всегда были люди, а не звери), то использовал другую тактику: глядел на натуру и фактически не смотрел на бумагу. При этом ножницы он держал в одной руке, почти не меняя их положение, а вот лист черной бумаги то и дело поворачивал в нужном направлении другой рукой.

Должен признаться, что поначалу силуэты людей на полях

книги о командорских зверях показались мне не совсем уместными — уж больно отличаются они по стилю от рисунков животных. Но по мере того как я возвращался к книге снова и снова, мое отношение менялось, и сейчас эти силуэты воспринимаются мною уже как совершенно органичные, тем более что изображенные люди упоминаются в тексте. И мне даже жаль, что в книжке про степных зверей силуэтов на полях нет.

Надо сказать, что хотя обе книжки и выдержаны в одном формате, между ними есть заметные различия. Книга о командорских зверях меньше по объему и более цельная. Речь там идет всего о пяти видах, причем всех этих зверей Сми-

рин наблюдал и рисовал непосредственно в природе. Для каждого из них он успел сделать не только серии набросков, но и готовые, прорисованные тушью, листы с изображениями элементов поведения и характерных поз. Изумительно красивы и представленные в книге зарисовки лежбища морских котиков и залежки тюленей антуров. С одной стороны — это вроде бы иллюстрация к зоологической работе, а с другой — графический лист, произведение искусства.

Хотя Смирин считал по-своему красивыми всех зверей, которые только существуют на свете, у него все же были любимчики. Таким на Командорских о-вах для него стал калан

(морская выдра). О своих впечатлениях Вадим Моисеевич пишет жене (фрагменты писем приведены на полях книги): «Это зверь, ради которого я поехал сюда... Я стараюсь использовать каждую возможность рисовать каланов. А рисовать их очень трудно, на берег они выходят мало, и на берегу очень осторожны. <...> А добраться стоило, даже невозможно это обсуждать! Один калан стоит того. <...> А зверь просто сказочный, хотя и очень трудно его рисовать. Мне даже не хочется сейчас без картинок какие-то подробности рассказывать. Одно только могу сказать: мне сейчас кажется нелепым думать о том, чтобы его использовать как пушного зверя. Это просто зверь, которого надо

показывать людям, чтобы они делались чуть-чуть лучше...».

Книга о степных млекопитающих больше по объему и несколько разнороднее — речь идет все же об обитателях не двух островов, а весьма обширной территории, фактически природной зоны. В книге уже 18 очерков об отдельных видах из самых разных отрядов. Тут и насекомоядные, и рукокрылые (летучие мыши), и зайцеобразные (пищухи), и, конечно же, в большом количестве грызуны, без которых степь просто немыслима. Авторы очерков (в алфавитном порядке): О.В.Брандлер, П.П.Гамбарян, П.П.Дмитриев, О.В.Жеребцова, Ю.М.Ковальская, Е.И.Кожурин, А.А.Лущеккина, Е.С.Непринцева, Н.С.Проскурина, К.А.Роговин, А.В.Суров, Ю.М.Терновская,



Поющая степная пищуха. Даже соловьи иногда перекликаются с этими животными.



Детеныши даурской пищухи в возрасте чуть более трех недель.



Щенок караганки — подвида обыкновенной лисицы.

С.В.Титов, Н.А.Формозов, А.В.Чабовский, Н.А.Щипанов.

Некоторые очерки, как мне показалось, все же слишком формальны, хотя составители и постарались компенсировать этот изъян гораздо более живыми текстами маргиналий. К сожалению, некоторые карандашные наброски, вынесенные на поля, даны на фоне каких-то фотографий, мешающих рассматриванию. Я бы также предпочел, чтобы фон этих рисунков был теплым белым (с желтоватым оттенком), но никак не холодным серым с синеватым оттенком, как сейчас. Однако это все мелкие придирки.

Что же касается смиринских рисунков, то они и здесь заворачивают, хотя разные виды были им «разработаны» в разной степени. Очень хороши наброски малой землеройки, детенышей даурской пищухи, карандашные рисунки разных поз байбака. Наиболее подробно в изобразительном ряду представлен сай-

гак — первый зверь, которого Смирин, по его собственным словам, начал целенаправленно рисовать в природе. Приведены в «степной» книге и некоторые старые, 50-х годов, рисунки Смирин. Они по-своему интересны, но в них еще не чувствуется смиринский стиль, сформировавшийся под влиянием рисунков Ватагина с их характерной угловатостью, опорой на прямые линии и подчеркнутой четкостью.

Поскольку всех зверей, о которых говорится в данной книге, объединяет среда обитания, то вполне уместной представляется и небольшая вводная глава об общих особенностях жизни зверей в степях. Написана она П.П.Дмитриевым, соратником по кафедре, хорошо знавшим Смирин и много проработавшим с ним в экспедициях. «Степная» книга полностью выложена в открытом доступе в Интернете, на сайте Центра охраны дикой природы\*. И этого нельзя не приветствовать, тем более что издана она (как и предшествующая книга о Командорах) в серии, девиз которой «Наука и искусство — экологическому образованию». Но должен сказать, что электронная версия все же не может заменить классический бумажный вариант: его очень приятно держать в руках, листать, читать, а главное — просто рассматривать. Конечно, очень хочется видеть продолжение издания, например «Портреты зверей лесной зоны» (есть же замечательные смиринские рисунки летяги, бурундука, раз-

\* [http://www.biodiversity.ru/programs/wildlife\\_art.html](http://www.biodiversity.ru/programs/wildlife_art.html)

ных куньих). Есть материалы и для портретов пустынных животных (множество рисунков большой песчанки, джейрана, да и других обитателей этой зоны). Есть удивительные рисунки обыкновенной домово́й мыши (можно и в лесную книжку вставить). Однако со слов составителей знаю, что сейчас все силы они хотят сосредоточить на издании многотомного атласа, пока первого его выпуска, посвященного ластоногим. К сожалению, на это еще недостаточно средств\*\*.

В заключение приведу слова Вадима Моисеевича из набросков к книге «Звери в природе» (они процитированы в «степной» книжке): *«В начале самостоятельной жизни и работы, вероятно, у каждого бывают моменты, когда кажется, что все в жизни получилось неправильно, что занесло тебя не туда, куда надо. <...> В один из таких моментов я шел вдоль сухого русла речушки и вдруг впереди увидел лисичку. Худая, в летнем мехе, ушастая лисица караганка, деловито опустив нос, трусила по зарослям полыни у края саксаульника. Учуяв что-то на земле, зверь остановился, покругился, приняюхиваясь, потом затрусил дальше. Больше ничего не было. Но было чудо — я увидел кусочек жизни вольного дикого зверя. Мгновенно вместо мрачных мыслей появилось ощущение праздника. Вся обстановка и сама жизнь стали другими».* ■

\*\* Желание помочь материально изданию книг В.М.Смирин могут проконсультироваться на сайте Центра охраны дикой природы.

Редакция благодарит А.И.Олексенко за помощь в иллюстрировании рецензии.

## Биология

ЭВОЛЮЦИЯ И СИСТЕМАТИКА: ЛАМАРК И ДАРВИН В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ: Сборник трудов Зоологического музея МГУ. Т.1 / Под ред. А.В.Свиридова, А.И.Шаталкина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2009. 337 с.

Сборник посвящен 200-летию юбилею выхода в свет книги Ламарка «Философия зоологии», 200-летию со дня рождения Дарвина и 150-летию юбилею публикации его «Происхождения видов путем естественного отбора». В сборник вошли доклады систематиков, представленные на юбилейной конференции, которая прошла в декабре 2009 г. в Зоологическом музее МГУ.

В работе А.И.Шаталкина рассматриваются ламарковская и дарвиновская модели эволюции, основанные на двух независимых концепциях — природы и наследственности. И.Я.Павлинов на большом историческом материале прослеживает освоение систематикой эволюционной идеи в XIX в. В статье Г.Ю.Любарского дана картина развития эволюционной мысли в разных областях социального и гуманитарного знания. А.С.Мартынов с позиций систематика-зоолога анализирует соотношение общих вопросов онтогенеза и эволюции. В работе А.В.Антронова показана связь эволюции жилкования крыльев у перепончатокрылых насекомых с условиями окружающей среды. Е.А.Дунаев выявил особенности дивергенции ящериц в аридных областях палеоарктической Азии, а А.А.Мосалов и Е.А.Коблик — эколого-географические тренды в окраске хищных птиц. О.Г.Нанова исследовала соотношения между внутривидовыми формами изменчивости песца, лисицы и корсака,

а Е.Г.Потапова — роль адаптивных факторов в таксономической дифференциации.

## Морская биология

**А.Н.Островский.** ПОВЕЛИТЕЛИ БЕЗДНЫ. (Серия «Разнообразие животных». Вып.5). М.; СПб.: Т-во научных изданий КМК. 2009. 216 с.

Автор этой, пятой по счету, книги из научно-популярной серии «Разнообразие животных», — зоолог, морской биолог, палеонтолог, подводник, доцент Санкт-Петербургского государственного университета. В книге идет речь о глубоководных обитателях океана, главным образом о гигантских головоногих моллюсках и об акулах, современных и ископаемых, ставших в наше время легендами. На основе новейших фактов рассказывается об особенностях строения, биологии и об эволюционной истории морских животных, а также о том, как в современных условиях работают зоологи и морские биологи. Автор знакомит читателя с научными гипотезами, помогающими понять тайны океана. Очень важный момент в книге — мысль о том, насколько узким океан и его обитатели и как воспитывать человеческое сознание в духе бережного отношения к этой, пока еще мало познанной стихии. Книга снабжена цветными вклейками и художественными графическими заставками к каждой главе.

## История науки

**Д.И.Менделеев.** ДИАЛОГ С ЭПОХОЙ: Сборник статей / Составитель Н.В.Успенская. М: Октопус, 2010. 272 с.

Изданный при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Феде-

ральной целевой программы «Культура России», сборник включает материалы, опубликованные в естественно-научном академическом журнале «Природа» (№1 за 2009 г.). Он был посвящен 175-летию со дня рождения великого ученого. В работе над изданием участвовали сотрудники Музея-архива Д.И.Менделеева при Санкт-Петербургском государственном университете.

Вклад Дмитрия Ивановича Менделеева (1834—1907) в мировую науку выдвигает его на первое место среди русских ученых обозримого времени. Открытый им в 1869 г. Периодический закон химических элементов изменил вектор развития коренных задач химии и физики, повлиял на мировосприятие и философию общества. Этим основным открытием отнюдь не замыкался удивительно широкий круг его интересов, включавший и экономику, и государственную политику. Он писал о том, где и зачем надлежит строить нефтеперерабатывающие заводы («сырье может добывать и дикарь»), как повысить плодородие почв, что может дать таможенный протекционизм, какой системе образования отдать предпочтение, какие выводы следуют из переписи населения, какие мысли и чувства рождает созерцание природы и живописи. Работая консультантом Морского министерства, Менделеев изобрел новый вид бездымного пороха. В одиночку поднимался на воздушном шаре. Построил модель ледокола и намеревался совершить высокоширотную экспедицию. У него был размашистый русский характер («я вольный казак») и богатая событиями личная судьба. Обо всем этом рассказывают авторы этого сборника — исследователи жизни и творчества Менделеева.

# В конце четвера Голконда — форт сокровищ

М.П.Жидков,  
кандидат географических наук  
Институт географии РАН  
Москва

Двадцать лет назад мне посчастливилось побывать в Индии — я попал в группу советских специалистов, которым предстояло заниматься проблемой прогноза землетрясений вместе с местными геологами. Кроме увлекательной работы нас в этой стране ждали настоящие чудеса. На меня из всего увиденного самое большое впечатление произвела Голконда.

Что такое Голконда? Это неприступный форт в южной части Индии — многомесячные осады и подземные ходы, предательства и легенды, алмазы и бриллианты, жестокие деспоты и их фаворитки, ученые и путешественники, авантюристы, завоеватели, купцы. Так или иначе с историей Голконды связаны имена, события и сокровища таких держав, как Англия, Россия, Франция, Германия. На копиях Голконды и, возможно, в ней са-

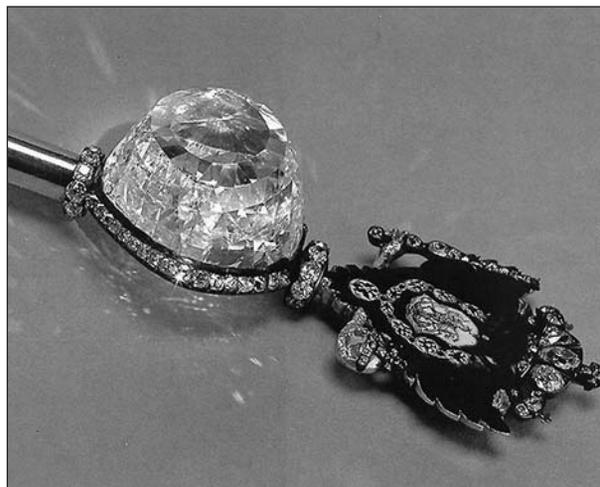
мой побывали венецианский купец Марко Поло в XIII в., тверской купец Афанасий Никитин в XV в., французский ювелир и путешественник Жан Батист Тавернье в XVII в. и др.

В южной части Индии алмазы добывают более 5 тыс. лет. Некогда богатая алмазами древняя страна Теленгана ныне образует штат Андхра-Прадеш с административным центром г.Хайдарабадом. Примерно в 200 км к югу от него находились многочисленные копи, разбросанные между реками Пеннару и Кришна, а также вдоль них (некоторые вблизи самой Голконды). Месторождения алмазов были связаны с аллювием — молодыми речными отложениями этих рек, с древними конгломератами и песчаниками, а также с основными и ультраосновными интрузивными породами [1].

На протяжении нескольких тысяч лет копи Голконды были единственным в мире источни-

ком алмазов: здесь найдены почти все самые крупные и знаменитые из них, в Средние века поступавшие в сокровищницу форта. В копиях Голконды были добыты «Кохинор», «Питт» (или «Регент»), «Дерианур», «Санси», «Шах Акбар» и многие другие. Ныне камни из копей Голконды можно увидеть в музеях Тегерана, Стамбула, Берлина, Дрездена, Лондона, Парижа и др., а также в частных коллекциях. «Кохинор» украшает британскую корону. В Алмазном фонде Московского Кремля хранится «Шах». Этот продолговатый прозрачный желтоватый кристалл нехарактерной для алмазов формы весом менее 20 г (около 88 карат) найден более 400 лет назад в копиях Голконды. На гранях алмаза — сделанные его владельцами в 1591, 1641 и 1824 гг. надписи. Самая первая сделана в 1000 г. по мусульманскому летоисчислению. Известно, что камень украшал Павлиний трон Великих Моголов — он свисал

© Жидков М.П., 2010



Алмазы «Шах» и «Орлов».

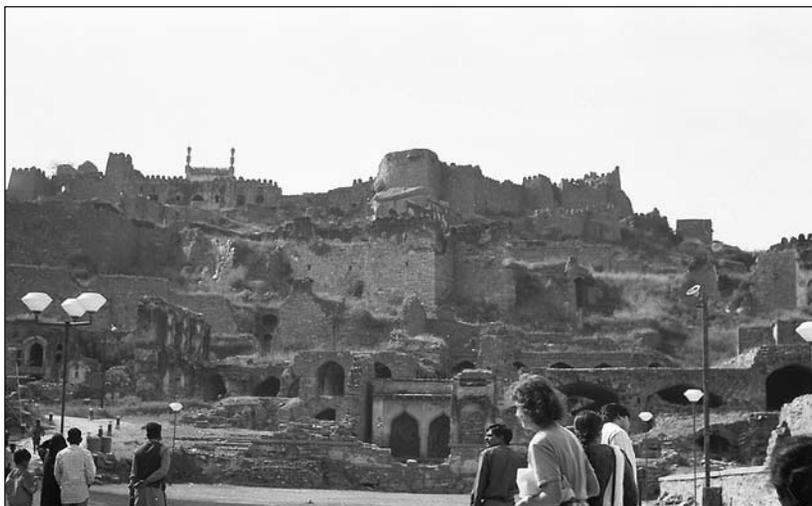
с балдахина на шнурке (для которого была сделана канавка) среди рубинов и изумрудов. Алмаз побывал в руках нескольких представителей этой династии — шахов Акбара, Шаха-Джахана, Аурангзеба, был захвачен персидским правителем Надир-шахом Афшаром. В Россию попал из Персии в 1829 г., когда был поднесен младшим сыном тогдашнего правителя Аббаса Мирзы принцем Хозревом Мирзой императору Николаю I в качестве «компенсации» за смерть русского посланника А.С.Грибоедова.

Алмаз «Орлов», который по праву считается самым замечательным из когда-либо найденных в Индии, тоже, побывав в руках Шаха-Джахана, Надир-шаха и др., попал в Россию к Екатерине II.

По преданиям, первый алмаз копеей Голконды случайно нашел пастух, который не придал своей находке никакого значения. Камень переходил из рук в руки, пока не попал к людям, сумевшим по достоинству оценить его свойства [2]. До X в., до начала грабительских набегов на Индию из Афганистана и Персии, алмазы почти не выходили за пределы Индийского п-ова. В Древней Греции были известны лишь несколько камней, попавших туда после похода Александра Македонского. В Европе алмазы начали входить в моду лишь с XIII в.

Выражение «копи Голконды», возможно, возникло в Средние века, когда возникло самостоятельное государство, столицей которого был форт Голконда, расположенный на левом берегу р.Муши, примерно в 8 км к западу от исторического центра современного города Хайдарабада. Ныне это руины огромной средневековой цитадели и довольно хорошо сохранившиеся стены и бастионы, хотя именно по ним приходились удары завоевателей.

Форт получил имя от холма, на котором построен. В переводе с языка телугу — народа, на-



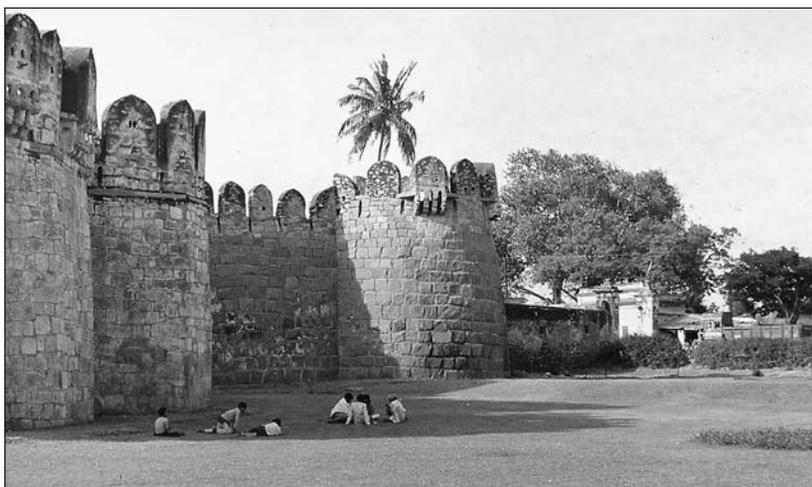
Руины Голконды.

Здесь и далее фото автора

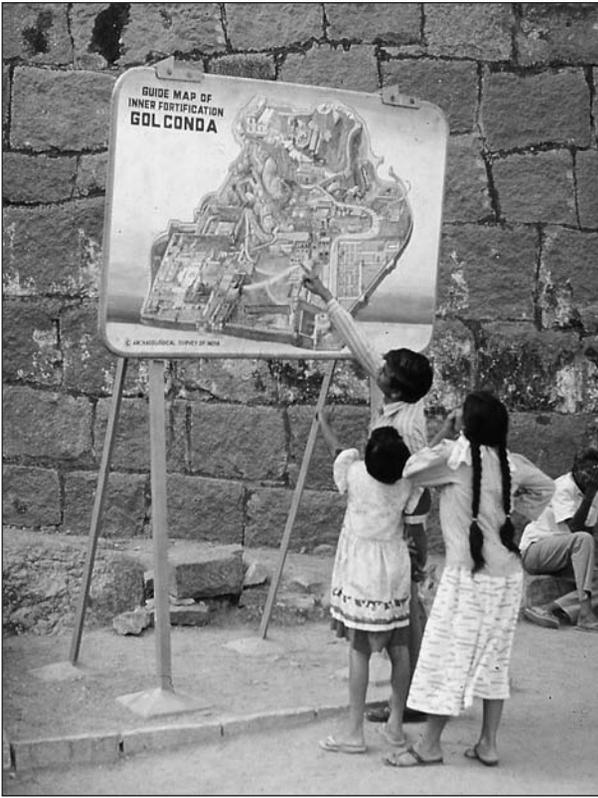
селяющего штат Андхра-Прадеш, — «галкор» означает «пастух», «конда» — «холм». Гранитный холм возвышается на 120 м над окружающими равнинами (это реликт рельефа древнего материка Гондваны, частью которого Индийская платформа была более 200 млн лет назад). Вокруг холма прослеживается депрессия, ныне частично занятая заболоченными подпрудными озерами, некогда входившими в систему защитных сооружений форта. Далее простираются обширные пространства, на которых разбросаны многочисленные и живописные гра-

нитные холмы, многие из которых напоминают руины городов. Голконда почти теряется среди них, выделяясь лишь большей высотой.

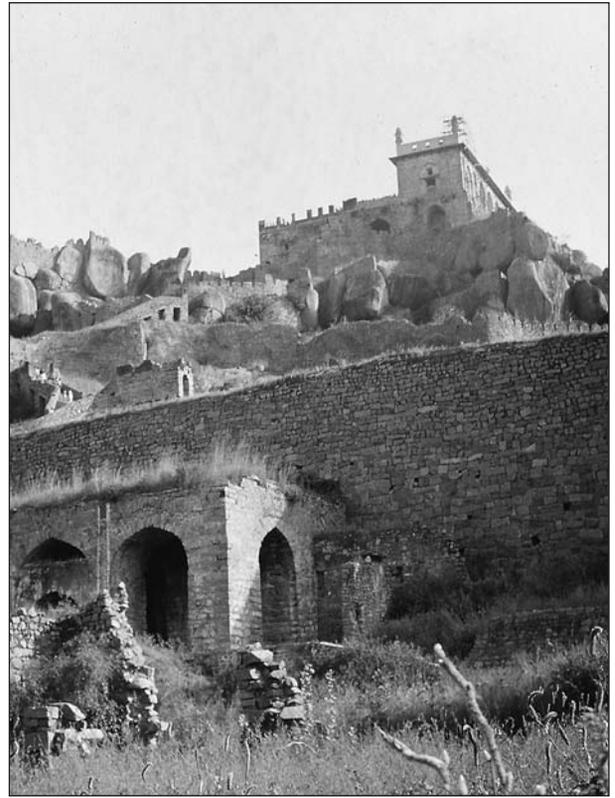
В 1143 г. правитель из династии Кокатий построил на холме крепость Манкал. Через 220 лет, в 1363 г., она перешла во владение мусульманской династии Бахманидов. В 1507 г. наместник Бахманидов Кули Кутуб уль-Мальк объявил Голконду независимым государством, а в 1512 г. принял титул султана Кули Кутуб-шаха I. Строительство укреплений форта, которые можно увидеть и сегодня, про-



Стены Голконды.



У плана цитадели.



Холм Голконды с шахским дворцом.

должалось последующие 62 года, главным образом во время правления Ибрагима Кутуб-шаха, а затем его сына Мохаммеда Кули Кутуб-шаха. Большинство населения города жило внутри стен. Знать и королевская семья располагались во внутренней

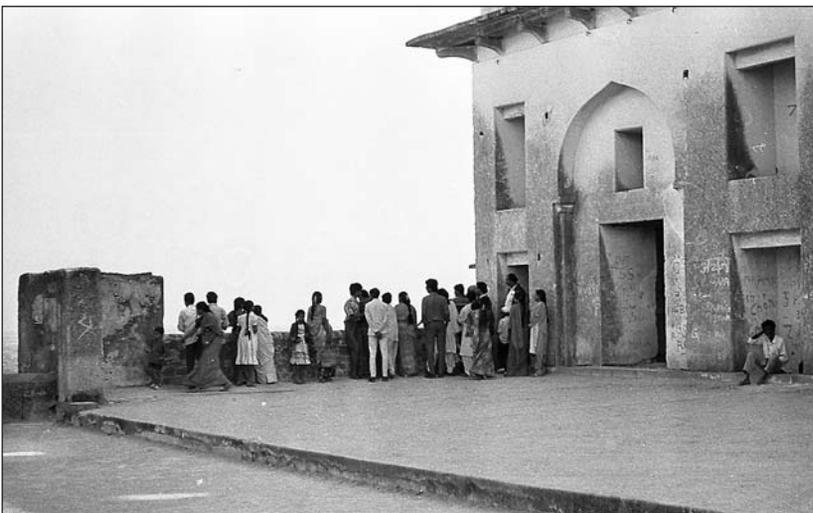
цитадели форта. На самой вершине холма сохранился королевский дворец. Отсюда открывается вид на весь форт и его окрестности [3].

При Кули Кутуб-шахе V, в 1590 г., из-за недостатка воды и места в форте пришлось осно-

вать новый город на противоположном берегу р. Муси, на обширном ровном пространстве. Первое время он назывался Бхажиянагар, по имени Бхажмати — прекрасной индусской фаворитки Кули Кутуб-шаха IV, позже Хайдарабадом — городом льва в честь двоюродного брата и зятя пророка Мухаммеда, халифа Али, имевшего прозвище Хайдар (арабское «лев») [3].

В эпоху династии Кутуб-шахов, правивших в XVI—XVII вв., Голконда, захватив обширные и экономически богатые территории, а также контроль над алмазными копами Южной Индии, вступила в эпоху своего легендарного богатства и стала самым процветающим царством Декана. Видимо, на эти времена приходилась наибольшая добыча и продажа алмазов.

Тверской купец Афанасий Никитин побывал в Индии в 1469—1474 гг., еще до воцарения династии Кутуб-шахов. Он жил в Бидаре (140 км к северо-



Королевский (шахский) дворец на вершине холма.



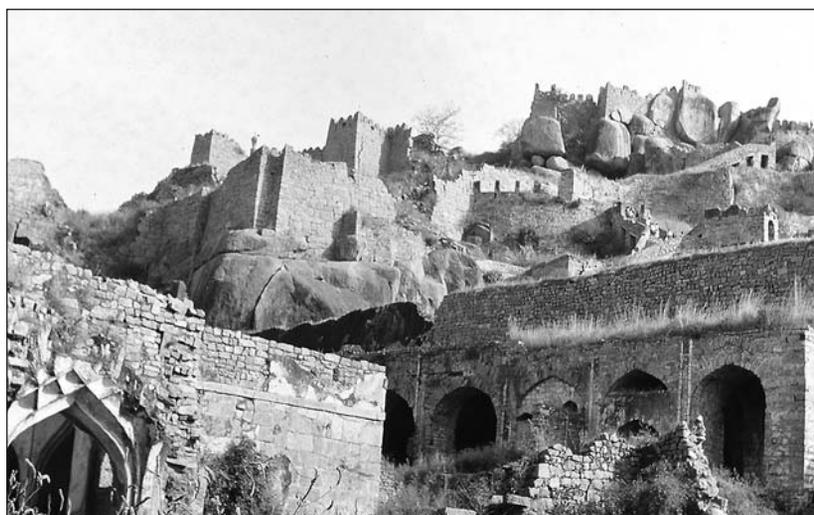
Мавзолеи Кутуб-шахов.

западу от Хайдарабада), который был тогда столицей мусульманского государства Бахманидов. По торговым делам и для «познания страны» русский купец посетил ряд городов в районах алмазных копей. Несколько месяцев жил в Каллуре (вблизи современного Райпура, в 200 км к юго-западу от Хайдарабада), где работали 300 мастеров, украшавших оружие алмазами. Оттуда направился в город, называемый им Коилкондой, где, по его свидетельству, был большой базар. Возможно, это была Голконда, еще не очень богатая и знаменитая. Именно после посещения Коилконды он отправился в родные края. Можно предположить, что Афанасий Никитин закупал в этих краях драгоценные камни, в основном алмазы. В конце путешествия турецкие власти в Трапезунде, скорее всего, отняли большую часть его товаров (или даже все), когда он уже договорился о переправе через Черное море

в Крым. Косвенным подтверждением наличия у купца алмазов служит его запись о том, что было «мелочи хорошей — все пограбили» [4].

Во время пребывания в Индии Никитин был свидетелем войны между мусульманским го-

сударством Бахманидов и индуистским Виджаянагаром, одной из причин которой могло быть владение алмазными копиями. Бахманиды штурмовали столицу индуистского государства город Виджаянагар, но не смогли им овладеть и понесли огром-



Арки в руинах.



Чарминар — триумфальная арка, построена в 1591 г. основателем Хайдарабада.

ные потери. Виджаянагар (что означает «город победы») был самым замечательным городом своего времени — по отзывам современников, полным очарования и чудес. Мусульмане захватили Виджаянагар спустя столетие в 1565 г., после чего он превратился в огромный пус-

тынный комплекс храмов, дворцов, различных строений и руин. Виджаянагар расположен в 350 км к юго-западу от Хайдарабада, на р.Тунгабхадра, вблизи г.Хоспета, у селения Хампи.

В XVI—XVII вв. Голконда была процветающим рынком драгоценных камней и могла служить

прообразом рассказов Синбада-морехода о долине драгоценностей. В то время дорога от центра Хайдарабада до Голконды длиной 10 км (ныне Голконда-роуд), представляла из себя сплошной рынок, где продавались алмазы, жемчуг, драгоценные камни, ювелирные изделия. Ныне старинный центр Хайдарабада — Чарминар — славится торговлей жемчугом и серебром. Здесь на перекрестке торговых улиц возвышается изумительное по красоте здание — башня Чарминар, построенная в 1591 г. Мохаммедом Кули Кутуб-шахом V [3]. По одной легенде, она построена в честь окончания чумы, унесшей жизни тысяч горожан. По другой — в честь будущей фаворитки Кутуб-шаха, на месте деревни, из которой его окликнула индусская красавица Бхагмати. Четыре башни-минарета, давшие название всему зданию, поднимаются на 24 м над основным объемом здания. У подножия юго-западного угла находится крошечный индуистский храм, посвященный богине Лакшми. Часы над арками были встроены в стены в 1889 г.

Захватившая копи и процветающая Голконда стала объектом экспансии других мусульманских правителей, создавших на севере Индии империю Великих Моголов. В 1687 г., после 8-месячной осады, в результате предательства Голконда была захвачена императором Делийского султаната Аурангзебом, последним из Великих Моголов. Он получил огромную добычу: обширный запас драгоценных камней, ювелирные изделия и значительную сумму денег наличностью (20 млн 50 тыс. рупий в монетах). Ворота, через которые торжественно входили в форт войска Ауренгзеба, называются Фатехдарваза — Ворота победы. Возможно, что падению Голконды способствовало истощение алмазных копий.

Неоднократные осады и несколько веков не смогли уничтожить мощные крепостные стены

Голконды длиной более 7 км (для сравнения: протяженность стен Московского Кремля около 2 км) с 87 полукруглыми бастиями и восемью огромными воротами. Из них только двое используются до сих пор. Это Фатех-дарваза на юго-востоке и Банджара-дарваза на северо-западе форта. И те, и другие сделаны из тяжелого тикового дерева и усеяны железными шипами — для защиты от ударов вражеских слонов. Над воротами можно увидеть отверстия в стене, через которые на головы нападавших лили кипящее масло. Стены высотой 15 м, как и бастиины, построены из прочного гранита. Ныне через Ворота победы в форт обычно входят туристы. От ворот пути по чередеступиц ведут на вершину холма к королевскому дворцу, ныне имеющему весьма аскетический вид. Большинство пушек, стоявших на бастиянах, были повреждены или куда-то отвезены. Одна из тех, что сохранилась в достойна внимания, «Путь к победе», использовалась войсками Ауренгзеба в ходе осады форта и осталась на бастиионе, на западной стене.

Внутри форта ныне можно увидеть фантастический комплекс руин крепостных стен, мечетей, индуистских храмов, дворцов, казарм и складов. От огромного здания для хранения зерна, построенного в 1642 г., во время осады Голконды Ауренгзебом, остался только остов. Сохранились водопроводные трубы, подведенные в сады и бассейны, а также подававшие питьевую воду в самые отдаленные и высокие части форта. В Голконде впечатляют живописные руины дворцов куртиза-

нок и бассейны, наполнявшиеся прежде розовой водой, рассказы о подземном ходе, соединявшем дворец Кутуб-шахов и центр Хайдарабада и другие интригующие истории. Здесь, в шахских апартаментах, на туго натянутом канате в лунные ночи танцевала звезда двора Тамарати, индуистская фаворитка седьмого из Кутуб-шахов, Абдуллаха Кутуб-шаха. Ее сохранившийся дворец можно увидеть с вершины Голконды на юго-западе в двух километрах.

Купола мавзолеев Кутуб-шахов (здесь похоронены почти все представители этого рода — не только правители, но и военачальники, родственники, выдающиеся певцы, танцоры) видны за стенами Голконды на северо-западе. Гробницы Кутуб-шахов строились во время правления каждого из монархов. В архитектуре они сочетают персидские, патанские и индуистские элементы. Возле каждого мавзолея своя мечеть. Памятники окружены садом.

Истожились алмазные копи, пал форт, и началась новая история Хайдарабада, на которую накладывається влияние прошлого Голконды. Последний хайдарабадский правитель — 7-й низам Осман Али-хан, смещенный индийским правительством в 1948 г., был одним из богатейших людей планеты, ему принадлежали огромные сокровища, в том числе в виде драгоценных камней и ювелирных изделий. Еще в конце прошлого века профессиональные танцовщицы являлись во дворцы Хайдарабада в одежде, усыпанной бриллиантами. В конце правления хайдарабадского низама Голконда служила государственной тюрь-

мой (обычная служба старых крепостей) и казначейством.

Затерянность руин города и форта, многочисленные события и легенды, связанные с ним, придают местности обаяние и романтичность. Голконду теперь штурмуют туристы. Здесь уже давно нет золота и драгоценных камней, но нередко находки отдельных алмазов в копях. Впрочем, на пути к Голконде туристов останавливают такие непреодолимые преграды, как Дели, Агра с Тадж-Махалом, Фатехпур Сикри, Эллор, Кайлас, Каджурахо и многие другие замечательные памятники архитектуры и истории Индии.

Современная добыча алмазов в Индии невелика, составляет доли процента от мировой и сосредоточена главным образом в другом районе, вблизи города Панна, в штате Мадхья-Прадеш. Месторождение разрабатывается гораздо меньшее время, чем Голконда, — всего 2 тыс. лет. В Индии традиции обработки алмазов сохранились и развиваются, индусы гранят большое количество алмазов, добываемых в других странах. В районах старых копей Голконды в 1961 г. геофизическими методами было найдено несколько кимберлитовых трубок [1]. В некоторых из них обнаружены алмазы. Возможно, копи Голконды еще возродят хотя бы часть былой славы. В последние же годы рынок Хайдарабада приобретает мировое значение из-за другого товара высокой ценности — математических способностей индусов. На базе научных центров, созданных при Индире Ганди, здесь производится заметная доля мирового программного обеспечения. ■

## Литература

1. *Krishnaswamy S.*, B.Sc. (Yjns). A.I.S.M. India's Mineral Resources. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford; New-Delhi; Bombay; Calcutta, 1979.
2. *Пыляев М.И.* Драгоценные камни. Их свойства, местонахождения и употребление / Репринтное издание 1888 г. М., 1990.
3. Hyderabad. Disha Gides. Hyderabad, 1991.
4. Хожение за три моря Афанасия Никитина 1466—1473 гг. / Под ред. Б.Д.Грекова и В.П.Адриановой-Перец. М.; Л., 1948.