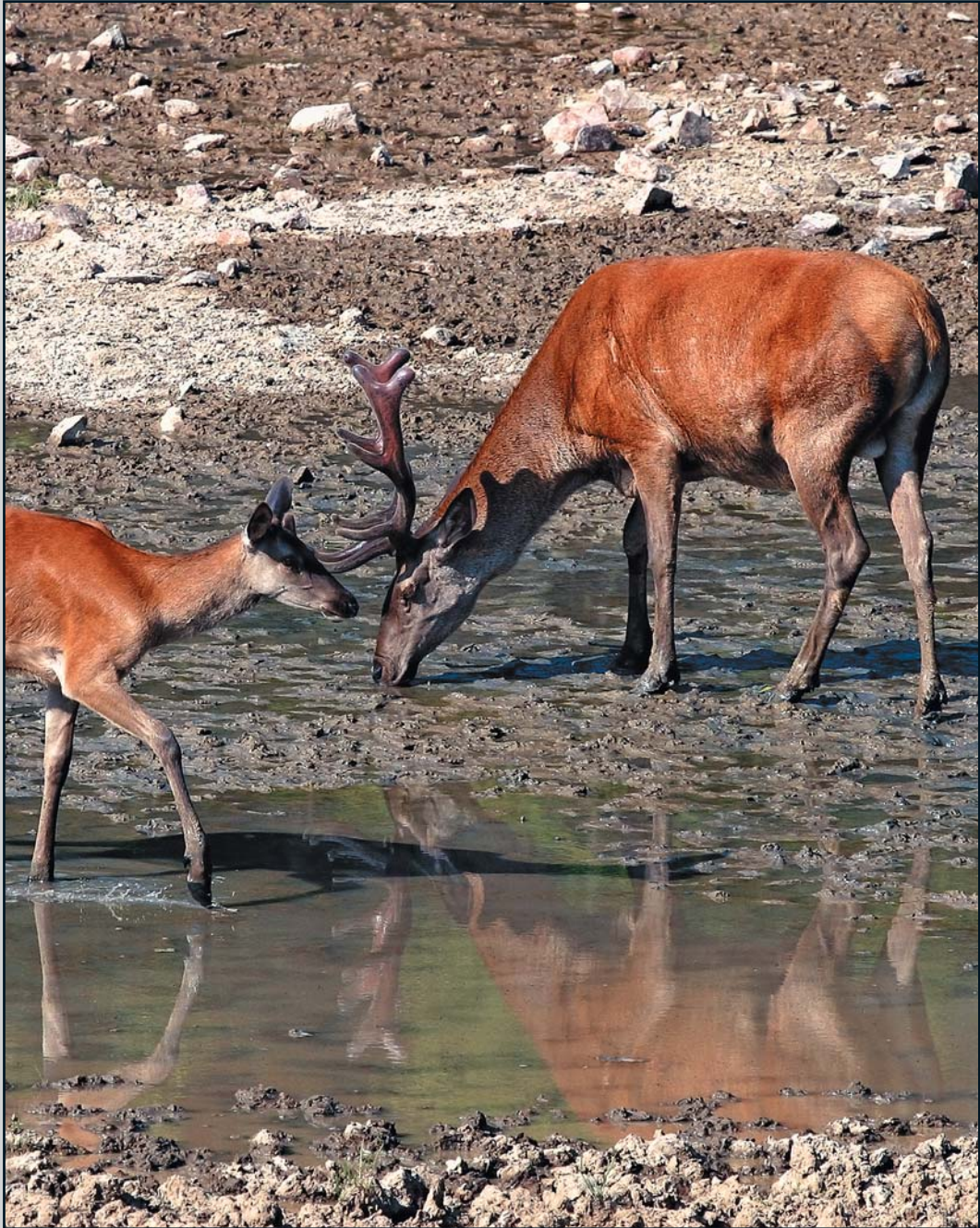


ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

4 16



Главный редактор  
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора  
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурич**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A. Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T. Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Куниин** (**E. Koonin**, США), академик, доктор геологоминералогических наук **Н.П.Лаверов**, доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор физико-математических наук **Л.Д.Фаддеев**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Олени изюбри, пьющие минерализованную воду из источника и поедающие глинистые грунты.

См. в номере: **Паничев А.М.** *Литофагия: причины феномена.*

Фото С.А.Пизюка

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Одна из находок из местонахождения Кулинда — фрагмент левой кисти лепидохейрозавра, представителя группы орнитомимозавров (некрупных хищных динозавров).

См. в номере: **Алифанов В.Р., Савельев С.В.** *Юрские динозавры Забайкалья.*

Фото С.В.Савельева



«Наука»

**В НОМЕРЕ:****3 Дроздов Ф.В., Пономаренко С.А.****Органические солнечные батареи — легкие, гибкие, полупрозрачные**

Солнечные батареи, все прочнее входящие в нашу жизнь, пока производятся на основе неорганических полупроводников. Хотя здесь достигнут отличный коэффициент полезного действия, такая продукция хрупка, достаточно тяжела, ограничена по геометрии, а главное, весьма дорога. Смогут ли составить ей конкуренцию солнечные элементы, построенные из органических материалов?

**15 Руденко В.Н.****След космической катастрофы: первая регистрация гравитационных волн**

В полувековую историю гравитационно-волнового эксперимента как попыток принять на Земле гравитационное излучение астрофизического происхождения наконец вписан первый успех: детекторами LIGO (США) зарегистрирован гравитационный сигнал от сливающихся компонент двойной черной дыры в глубинах Вселенной.

**25 Паничев А.М.****Литофагия: причины феномена**

За почти вековое изучение литофагии (заглатывания животными песка, глины и т.д.) накоплено немало данных. Однако до сих пор у исследователей нет единого мнения о том, каковы причины этого явления.

**35 Алифанов В.Р., Савельев С.В.****Юрские динозавры Забайкалья**

Какие динозавры жили в поздней юре на территории современного Забайкалья? Обитал ли там единственный вид, соединявший в себе признаки нескольких таксономических групп, или несколько видов, относящихся к разным семействам? Какие кожные покровы были у ящеров?

**45 Черных Е.Н.****Русь, Россия и культуры Степного пояса: от аваров до Золотой Орды**

С появлением восточнославянских племен началась длительная эпоха их тесного взаимодействия с кочевыми народами Евразии. По мнению ведущих историков, именно скверные соседи и, позднее, «триста лет татаро-монгольского ига» стали причиной многочисленных невзгод, выпавших на долю русских княжеств. Попробуем разобраться, так ли это?

**Апрельский факультатив****56 Расцветаева Р.К.****Король Кальцит****Научные сообщения****70 Козина Н.В., Леин А.Ю., Дара О.М.****Неизвестные биоморфные структуры — природные образования или лабораторный артефакт?**

Кулаков И.Ю., Забелина И.В.

**Глубинные источники вулканизма на Кавказе (73)****Времена и люди****76 Андреев А.И.****Природой очарованные странники  
Н.М.Пржевальский и его ученики****86****Новости науки**

Исследование космических лучей в Антарктиде. Антонов Р.А., Роганова Т.М., Чернов Д.В. (86). «Радиоастрон» разглядел ядро галактики с рекордной детализацией (87). Геохимический стресс как причина вымирания мамонтов. Лещинский С.В. (88). Поселения эпохи дзёмон. Соловьева Е.А. (89)

**Рецензии****91 Рундквист Д.В.****В подтверждение вышесказанного?  
(на кн.: М.В.Родкин. Катастрофы и цивилизации: Проблема выживания цивилизаций глазами физика)****93****Новые книги**

## CONTENTS:

### 3 Drozdov F.V., Ponomarenko S.A. Organic Solar Cells – Lightweight, Flexible, Semitransparent

*Solar cells becoming ingrained in our everyday lives are made of inorganic semiconductors so far. Albeit they show reasonably good efficiency, such products are brittle, quite heavy, limited in form-factor and most importantly rather expensive. Will organic solar cells be able to provide competition for them?*

### 15 Rudenko V.N. A Trace of the Cosmic Catastrophe: First Detection of Gravitational Waves

*First success was written at last in semi-centenary history of gravitational-wave experiment trying to detect on Earth gravitational radiation of astrophysical origin. LIGO (USA) detectors recorded a gravitational signal from a binary black hole merger in the distant Universe.*

### 25 Panichev A.M. Geophagia: Causes of the Phenomenon

*For almost century-old investigation of geophagia (eating stones, sand, clay, etc.) in animals much data were collected. But there is still no consensus on the reasons for this phenomenon.*

### 35 Alifanov V.R., Saveliev S.V. Jurassic Dinosaurs from Transbaikal Region

*Which dinosaurs lived in the Late Jurassic period in the territory of modern Transbaikal region? Was it the one and only species combining features of several taxonomic groups, or several species from different families? What kind of integuments did they have?*

### 45 Chernykh E.N. Rus, Russia and Steppe Belt Cultures: from Avars to Golden Horde

*With the appearance of East Slavic tribes long-term period of their close interaction with Eurasian nomadic nations started. As top historians think, it were nasty neighbors and later three hundred years of the Tatar-Mongol yoke that caused numerous miseries which befell Russian principalities. Let's try to figure out whether it is so.*

## April Lectures

### 56 Rastsvetaeva R.K. King Calcite

## Scientific Communications

### 70 Kozina N.V., Lein A.Yu., Dara O.M. Unknown Biomorphic Structures – Natural Formations or Laboratory Artifact?

### Koulakov I.Yu., Zabelina I.V. Deep Sources of Volcanism in Caucasus (73)

## Times and People

### 76 Andreev A.I. Wanderers Fascinated by Nature N.M.Przhevsky and His Disciples

## 86 Science News

Investigation of Cosmic Rays in Antarctica. **Antonov R.A., Roganova T.M., Chernov D.V.** (86). «RadioAstron» Imaged Galactic Nucleus with Ultra-High Resolution (87). Geochemical Stress as the Cause of Mammoth Extinction. **Le-schinsky S.V.** (88). Settlements of Jomon Epoch. **Solovyeva E.A.** (89)

## Book Reviews

### 91 Rundkvist D.V. In Support of Mentioned Above? (M.V.Rodkin. Disasters and Civilizations: Survival Problem of Civilizations as Viewed by a Physicist)

## 93 New Books

# Органические солнечные батареи — легкие, гибкие, полупрозрачные

Ф.В.Дроздов, С.А.Пономаренко

Сегодня большинство из нас не только слышало о солнечных батареях, но и успело убедиться в их работоспособности. Электроника с источниками энергии на их основе — калькуляторы, часы и портативные зарядные устройства — давно и успешно используется в нашей повседневной жизни. С развитием энергосберегающих технологий солнечные батареи все больше внедряются в различную электронную технику, используемую для городских нужд, таких как энергопитание уличных фонарей, светофоров и подсветка дорожных знаков. Более того, в мире уже существуют коммерчески доступные решения для размещения солнечных панелей на крыше, не только обеспечивающие электричеством отдельный дом, но и отдающие избыточную электроэнергию в городскую сеть. Широко применяются солнечные батареи в открытом космосе — в качестве «бензобаков» орбитальных станций, спутников и других космических аппаратов.

## Почему органические?

В настоящее время рекорд для коэффициента полезного действия (КПД) фотоэлемента, служащего элементарным звеном

© Дроздов Ф.В., Пономаренко С.А., 2016



**Федор Валерьевич Дроздов**, аспирант Института синтетических полимерных материалов им. Н.С.Ениколопова РАН. Занимается синтезом сопряженных полимеров для органической фотовольтаики.



**Сергей Анатольевич Пономаренко**, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, заведующий лабораторией функциональных материалов для органической электроники и фотоники того же института, профессор кафедры органической химии химического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова. Лауреат премии им. С.В.Лебедева РАН (2010). Область научных интересов — новые материалы для органической электроники и фотоники.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, органические полупроводники, органическая электроника.

**Key words:** solar cells, organic semiconductors, organic electronics.

солнечных батарей, составляет 46% [1]. Он был достигнут в декабре 2014 г. в результате успешного немецко-французского сотрудничества для так называемых *многопереходных* фотоэлементов на основе интерметаллидов GaInP/GaAs, GaInAsP/GaInAs с использованием *солнечного концентратора* в виде линзы Френеля. Последняя позволила собрать на небольшой четырехпереходной фотовольтаической ячейке площадью всего 5.2 мм<sup>2</sup> солнечное излучение с площади в 508 раз большей и тем самым повысить эффективность устройства. Данная технология показывает высокий современный уровень развития фотовольтаики: путем различных технологических решений удалось обойти теоретический предел эффективности солнеч-

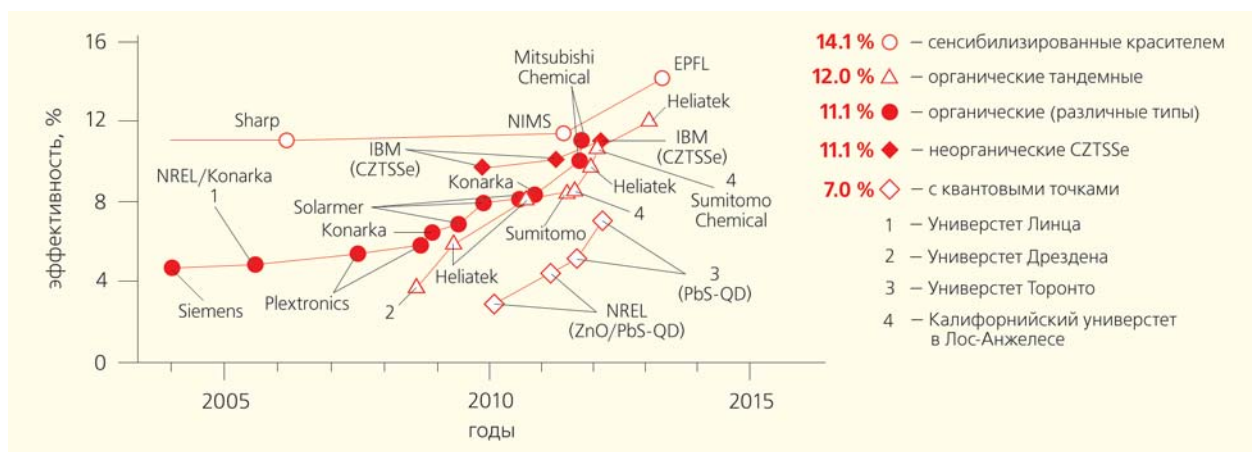


Рис.1. Диаграмма роста КПД новых типов солнечных фотоэлементов за последнее десятилетие. Данные NREL (National Renewable Energy Laboratory, Национальная лаборатория возобновляемой энергетики, США).

[www.nrel.gov/ncpv/images/](http://www.nrel.gov/ncpv/images/)

ных батарей в 33%, установленный У.Шокли и Х.Квайсером для фотовольтаического устройства с одним *p-n*-переходом [2].

Несмотря на столь внушительный прогресс, в течение последнего десятилетия наряду с другими новыми типами солнечных фотоэлементов, такими как сенсibilизированные красителями, фотоэлементы на основе квантовых точек или нетрадиционных неорганических полупроводников (сульфидов или селенидов меди-цинка-олова — CZTSSe), активно развивается и органическая фотовольтаика (рис.1). В последнем случае мы имеем дело с устройствами на основе органических полупроводников, к которым можно отнести  $\pi$ -сопряженные органические и элементоорганические молекулы, олигомеры и полимеры, органические красители и комплексы металлов. КПД таких фотоэлементов к настоящему времени достиг 12%, что пока намного ниже возможностей, демонстрируемых солнечными батареями на основе традиционных полупроводников.

Но если КПД органических фотоэлементов далеко от рекорда современной фотовольтаики, почему сейчас они привлекают большое внимание? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо сравнить не только эффективность, но и другие каче-

ственные характеристики органических и традиционных солнечных элементов, различающихся как применяемыми в них функциональными материалами, так и конструкцией устройств. Традиционные солнечные батареи основаны на неорганических полупроводниках: высокочистом кремнии в различных модификациях (аморфном, моно- или поликристаллическом), интерметаллидах (CdTe, GaAs, GaInP и др.), так называемых CIGS-элементах (сокращение от англ. copper indium gallium selenid). Показывая рекордные КПД в 20–46% [1], такие солнечные батареи имеют ряд серьезных недостатков: они хрупкие, весьма тяжелые, исключительно плоской геометрии, с токсичными веществами (либо входящими в состав, либо используемыми при изготовлении). Главный же их недостаток — высокая стоимость материалов и производства наиболее эффективных батарей. В то же время солнечным батареям на основе органических полупроводников можно придать такие качества, как легкость, гибкость, ударопрочность и полупрозрачность. Кроме того, органические солнечные батареи потенциально дешевле и проще в производстве, поскольку для их изготовления могут быть использованы высокопроизводительные рулонные технологии печати на гибких под-



Рис.2. Возможные области применения органических солнечных батарей: в качестве полупрозрачной крыши остановок общественного транспорта (а), в энергоэффективных окнах (б) и для зарядки портативных электронных устройств (в).

ложках. Все эти качества важны там, где невозможно применить хрупкие неорганические полупроводники. Например, можно шить одежду и обувь с использованием гибких органических фотоэлементов, встраивать их в шторы и обои, применять цветные полупрозрачные пленки для дизайна окон, дверей и стен энергетически эффективных зданий и сооружений, автомобилей и летательных аппаратов (рис.2).

Логично также ожидать, что в ближайшее время органические фотоэлементы найдут применение совместно с другими изделиями органической электроники для создания гибких и легких интерактивных портативных устройств, например для интеллектуальной упаковки товаров, гибких пластиковых карт, сенсоров и т.д. Таким образом, органические полупроводники открывают совершенно новые горизонты для использования ставшей уже привычной технологии солнечной энергетики.

### В чем различие?

Как же работает солнечная батарея и в чем заключаются основные отличия органического фотогальванического элемента от неорганического? В основе любого из них лежит явление фотоэффекта. По определению, фотоэффект — это высвобождение электронов в веществе под действием света или любого другого электромагнитного излучения: испускание их наружу (внешний фотоэффект) или вовлечение в проводимость (внутренний фотоэффект). Для описания процессов, происходящих при облучении светом неорганических полупроводников, необходимо вспомнить *зонную теорию проводимости твердых тел*. В самом упрощенном виде ее постулаты выглядят так. Близкие по энергии состояния, которые могут занимать электроны в веществе, состоящем из множества атомов, объединяются в *зоны*. В обычных условиях валентные электроны в твердом теле образуют химические связи и занимают самые низшие по энергии уровни, совокупность которых называют *валентной зоной*. Однако если электрону передать энергию, большую энергии связи, он может перейти в более высокоэнергетические состояния, находящиеся в *зоне проводимости* (рис.3). В ней электроны уже не принадлежат каким-либо определенным атомам и, следовательно, могут служить свободными носителями заряда, а на их месте в валентной зоне возникает «отсутствие электрона», или так называемая *дырка* (квазичастица), которая тоже свободно мигрирует по веществу, поочередно меняясь местами с соседними электронами и перенося при этом положительный заряд. В проводниках валентная зона перекрывается с зоной проводимости, поэтому электроны перемещаются без затрат энергии, что и объясняет хорошую электропроводность металлов (рис.3,а). Однако в случае диэлектриков и полупроводников между валент-

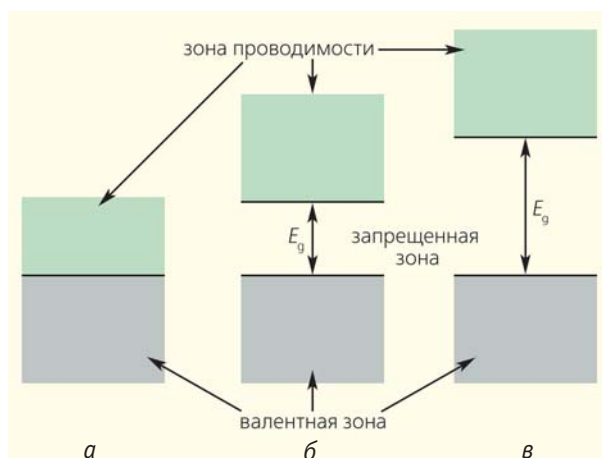


Рис.3. Схематическая зонная диаграмма для проводника (а), полупроводника (б) и диэлектрика (в).

ной зоной и зоной проводимости существует энергетический барьер, называемый *запрещенной зоной* (рис.3,б,в). Чем он больше, тем более высокую энергию нужно сообщить электрону, чтобы тот попал в зону проводимости. В диэлектриках запрещенная зона настолько широкая ( $E_g > 3.5$  эВ), что при комнатной температуре электронам не хватает энергии теплового возбуждения для ее преодоления. Только в случае очень мощных энергетических воздействий удается «пробить» диэлектрик, и тогда через него пройдет электрический ток. Для полупроводников  $E_g$  обычно составляет 0.1–3.5 эВ, поэтому даже при обычных условиях полупроводник может проводить электрический ток — за счет *собственной проводимости*.

Из зонной теории следует, что при облучении собственного полупроводника фотонами с энергией  $E > E_g$  полупроводник начнет образовывать свободные пары электрон-дырка, разделение которых на разноименные заряды и лежит в основе работы солнечного элемента. Так, в 1876 г. У.Адамс и Р.Дэй обнаружили наличие тока при облучении солнечным светом куска селена, находившегося между двумя электродами. Однако КПД такого элемента был очень мал, что объяснялось низкой концентрацией собственных носителей зарядов (их наличие, напомним, обусловлено тепловыми флуктуациями). Поэтому для повышения концентрации зарядов в чистый собственный неорганический полупроводник вносят донорные или акцепторные примеси, которые придают ему преимущественно либо донорную (полупроводник *n*-типа), либо акцепторную (полупроводник *p*-типа) проводимость за счет избыточного содержания электронов или дырок соответственно. В этом случае говорят про основные носители заряда как преобладающие в данном виде полупроводника. Такой процесс искусственного увеличения зарядов иначе называют *допированием* или *легированием* неорганического полупроводника.

В органических полупроводниках, в силу отличий молекулярной структуры органических веществ от неорганических, объединения энергетических уровней соседних молекул в общие зоны не происходит, и в большинстве случаев проводимость в них осуществляется по прыжковому механизму путем скачкообразного перемещения электронов или дырок от одной органической молекулы к другой [3]. Однако формально можно сопоставить верхней границе валентной зоны неорганического полупроводника высшую занятую молекулярную орбиталь (ВЗМО) органического полупроводника, а нижней границе зоны проводимости — низшую свободную молекулярную орбиталь (НСМО) органического полупроводника, как это схематически представлено на рис.4. Не вдаваясь в подробности теории молекулярных орбиталей, отметим, что полупроводниковые свойства могут проявлять только органические соединения, содержащие в составе молекулы  $\pi$ -связи, электронная плотность в которых преимущественно располагается над и под плоскостью  $\sigma$ -связей, связывающих центры соседних атомов углерода и других присоединенных к ним атомов. В простейшем случае образование  $\pi$ -связи происходит

путем перекрывания двух  $2p_z$ -электронов при образовании  $sp^2$ -гибридных атомных орбиталей из  $2s$ -,  $2p_x$ - и  $2p_y$ -электронов углерода. Более того, органические полупроводники должны содержать не одну, а несколько сопряженных  $\pi$ -связей, представляющих собой ряд последовательно перекрывающихся  $\pi$ -связей от соседних атомов углерода, связанных поочередно одинарной ( $\sigma$ ) и двойной ( $\sigma$  и  $\pi$ ) связями, которые составляют единую молекулу. Именно таким образом можно снизить ширину запрещенной зоны (расстояния между энергетическими уровнями ВЗМО и НСМО) органических молекул до значений менее примерно 2.5 эВ, достаточных для проявления полупроводниковых свойств при комнатной температуре.

Разницу в электронной структуре органических и неорганических полупроводников и, как следствие, в механизмах проводимости можно считать первым принципиальным отличием органических фотовольтаических ячеек от неорганических. Второе существенное отличие заключается в том, что при облучении светом свободные заряды в органическом полупроводнике появляются не сразу, как в случае кремния и большинства других неорганических полупроводников: сначала

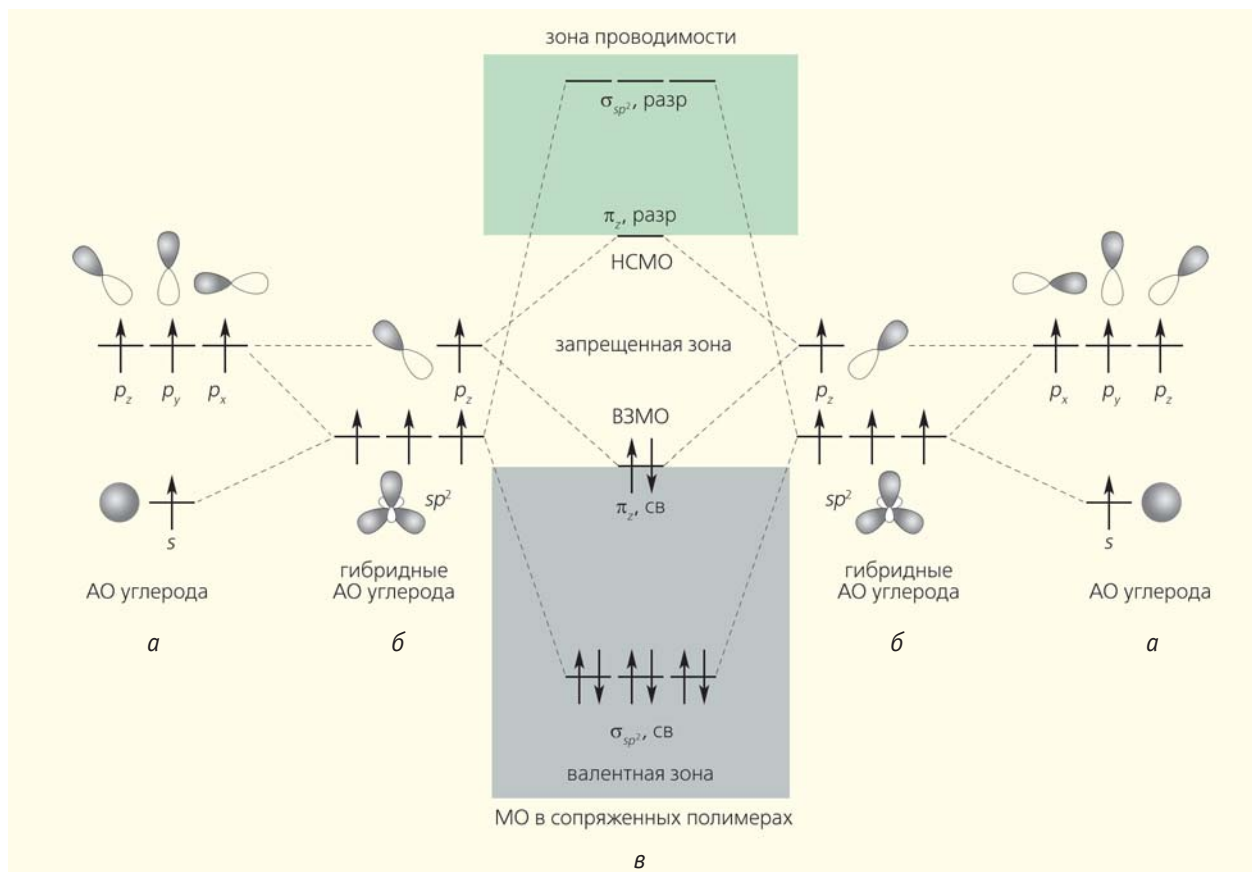


Рис.4. Схема взаимосвязи зонной теории твердого тела и теории молекулярных орбиталей для органических полупроводников: атомные орбитали (АО) углерода (а),  $sp^2$ -гибридные АО углерода (б), молекулярные орбитали (МО) (в), св — связывающие МО, разр — разрыхляющие МО.



ла образуется связанная пара электрон-дырка, называемая *экситоном*\*. Поэтому солнечные батареи на основе органических полупроводников иногда называют *экситонными* [4]. Образовавшийся экситон может либо обратно *рекомбинировать* без разделения зарядов, либо распасться, образуя свободные электрон и дырку, которые и нужны для доставки зарядов к электродам. Однако из-за достаточно большой энергии связи экситона — около 0.3 эВ — распад на заряды может произойти лишь под действием внешнего фактора, например электрического поля потенциального барьера, которое всегда присутствует на границе раздела материалов с разной работой выхода\*\* (на *p-n*-переходах, гетеропереходах и др.)\*\*\*. Поэтому образовавшийся в объеме органического полупроводника экситон должен сначала диффундировать до границы гетероперехода, перед тем как на нем произойдет генерация и разделение зарядов. Длина же диффузии экситонов в органических полупроводниках довольно мала и составляет порядка 10 нм. Зато для поглощения большей части падающего света достаточно всего 100-нанометрового слоя органического полупроводника ввиду его большого сечения поглощения. Это примерно в 30 раз меньше, чем толщина слоя кремния (около 3 мкм), необходимая для достижения той же эффективности поглощения света, что вместе с меньшей плотностью органических полупроводников (обычно 1.1–1.3 г/см<sup>3</sup>) по сравнению с кремнием (2.33 г/см<sup>3</sup>) обуславливает легкость органических фотовольтаических ячеек. Снизив толщину активного слоя до значений менее 100 нм и используя прозрачные катод и анод, удастся получить полупрозрачные органические фотоэлементы типа представленных на рис. 2а, б.

В итоге толщина органической фотовольтаической ячейки оказывается примерно на порядок больше длины диффузии экситона, поэтому образующийся при фотовозбуждении органического полупроводника экситон с большей вероятностью рекомбинирует в его объеме, чем разделиться на свободные заряды. Чтобы повысить вероятность диссоциации экситонов, в органической фотовольтаической ячейке используют два полу-

проводниковых компонента — донорный (Д, будем называть его просто донором) и акцепторный (А, далее акцептор), на границе раздела фаз между которыми (переходе) и происходит диссоциация экситонов. Различное расположение уровней ВЗМО и НСМО донора и акцептора способствует разделению зарядов. Однако следует учесть, что, в отличие от примесного характера неорганических полупроводников, тип проводимости органических полупроводников определяется положением уровней их граничных орбиталей относительно уровня Ферми  $E_{F_0}$  электрода [5]. Если последний ближе к энергии ВЗМО органического полупроводника, то в него легче будет осуществляться инжекция (или сбор с него) дырок и основным типом носителей заряда в нем будут дырки, т.е. он будет вести себя как полупроводник *p*-типа. Это, как правило, справедливо для всех электродов из металлов с большой работой выхода, например золота с  $E_{Au} = 5.1–5.47$  эВ. В случае же близкого значения уровня Ферми электрода и энергии НСМО органического полупроводника, в него легче будет осуществляться инжекция (или сбор с него) электронов и основным типом носителей заряда в нем будут электроны, т.е. он будет вести себя как полупроводник *n*-типа. Для этого зачастую делают электроды из металлов с низкой работой выхода, например, из кальция с  $E_{Ca} = 2.87$  эВ.

Большинство сопряженных органических соединений проявляют полупроводниковые свойства *p*-типа и при этом служат (внимание!) донорными компонентами органических фотовольтаических ячеек. Наиболее распространенные полупроводники *n*-типа в органической фотовольтаике — фуллерены  $C_{60}$  и  $C_{70}$  и их различные растворимые производные. Например, метиловый эфир [6,6]-фенил-С61-бутановой кислоты (PC<sub>61</sub>BM) или метиловый эфир [6,6]-фенил-С71-бутановой кислоты (PC<sub>71</sub>BM) чаще всего используются в качестве (внимание!) акцепторного компонента органических фотовольтаических ячеек. Дело в том, что на границе многих донорных органических полупроводников с фуллереновыми акцепторами эффективность разделения экситонов на свободные заряды достигает 100%, вероятно, из-за сферической молекулярной структуры фуллеренов.

Здесь внимание читателя мы хотели привлечь к разнице в терминологии, принятой для неорганических и органических полупроводников. Под донорным компонентом в органической фотовольтаической ячейке понимают такой органический полупроводник, который после электронного возбуждения отдает электрон со своей НСМО акцепторному компоненту. Донор отдает электрон, а акцептор — принимает. Но после того как донор электрон отдал, у него в качестве носителя заряда останется только свободная дырка, т.е. по типу проводимости он оказывается полупроводником *p*-типа. А в акцепторном компоненте,

\* На самом деле и в кремнии при возбуждении светом сначала образуются экситоны, но энергия связывания в них электрона и дырки настолько мала (примерно 20 мэВ), что она меньше энергии теплового движения атомов при комнатной температуре (около 25 мэВ). Поэтому экситоны в кремнии сразу же после образования распадаются на свободные заряды.

\*\* Работа выхода — отсчитываемая от уровня Ферми минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы тот мог покинуть твердое тело.

\*\*\* В неорганических солнечных элементах барьер перехода тоже используется для разделения потоков — только уже свободных — зарядов. Именно наличие этого поля и вызывает движение носителей разного знака в противоположные стороны, т.е. появление фотоэдс.

наоборот, в результате переноса электронов с донорного компонента образуется избыток электронов, т.е. акцептор в органической фотовольтаике — полупроводник *n*-типа.

### Работа фотоэлемента и ее результаты

Рассмотрим упрощенную модель работы органического фотоэлемента на примере одной из наиболее изученных систем: донор поли(3-гексилтиофен) (РЗНТ) и акцептор PC<sub>61</sub>BM в фотовольтаической ячейке состава ITO/PEDOT:PSS/РЗНТ:PCBM<sub>61</sub>/Al, КПД которой достигает 3–5% (рис.5). При облучении такого устройства солнечным светом электрон, например в донорном компоненте, может поглотить фотон с энергией не меньше ширины его запрещенной зоны и перейти в возбужденное состояние, переместившись с ВЗМО на НСМО донора (см. рис.5). Образовавшийся в результате экситон диффундирует из объема донора до границы с акцептором, где может произойти его диссоциация на свободные заряды. Для лучшего разделения зарядов необходимо, чтобы разница между энергетическими уровнями акцептора  $E_{(НСМО, А)}$  и донора  $E_{(НСМО, Д)}$  была не меньше энергии связывания экситона, т.е.  $E_{(НСМО, А)} - E_{(НСМО, Д)} > 0.3$  эВ. Тогда электрону будет выгоднее перейти с НСМО донора на НСМО акцептора, в результате чего произойдет генерация и разделение зарядов. Затем образовавшийся электрон диффундирует через слой акцептора на электрод, уровень Ферми  $E_{Fк}$  которого близок к  $E_{(НСМО, А)}$  — он заряжается отрицательно, т.е. будет работать как катод элемента. Образовавшаяся на ВЗМО донора дырка диффундирует к аноду, в качестве которого чаще всего используется прозрачный для солнечного света ITO (Indium-Tin Oxide — оксид индия-олова) с уровнем Ферми  $E_{Fа} = -4.7$  эВ. Для лучшего согласования ВЗМО донора с уровнем Ферми анода, как правило, используют дополнительный дырочно-транспортный слой, работа выхода которого имеет промежуточное значение между  $E_{(ВЗМО, Д)}$  и  $E_{Fа}$ , что облегчает транспорт дырок к аноду. Для этого чаще всего берут комплекс поли(3,4-этилендиокситиофен):полистиролсульфокислота (PEDOT:PSS) с работой выхода  $E_{PEDOT} = 5.0-5.2$  эВ [6]. Роль слоя PEDOT:PSS также заключается в сглаживании шероховатостей слоя ITO, что повышает эффективность работы устройства.

Основные характеристики любого фотоэлемента определяются из его вольтамперных

характеристик (ВАХ). Типичные ВАХ органического фотоэлемента при освещении показаны на рис.6. На кривой при нулевой величине приложенного напряжения определяется плотность тока короткого замыкания  $J_{кз}$ . Напряжение, которое нужно приложить, чтобы скомпенсировать электродвижущую силу ячейки (т.е. привести ток к нулю), называется напряжением холостого хода  $V_{хх}$ . Если в каждой точке кривой в четвертом квадранте перемножить координаты (ток и напряжение), найдется некая точка, в которой это произведение максимально по абсолютной величине. Данная точка максимальной мощности  $P_m$  определяет реальную эффективность фотовольтаического элемента; в ней принято обозначать величины  $J$  и  $V$  как  $J_m$  и  $V_m$ . Максимальная электрическая мощность фотовольтаической ячейки в расчете на единицу ее площади задается произведением трех основных параметров ее вольтамперных характеристик: напряжения холостого хода, плотности тока короткого замыкания и фактора заполнения ( $FF$ , fill factor), который по определению равен:

$$FF = P_m / (V_{хх} J_{кз}) = (V_m J_m) / (V_{хх} J_{кз}).$$

Более наглядно,  $FF$  — это отношение площади прямоугольника со сторонами  $V_m$  и  $J_m$  к площади прямоугольника со сторонами  $V_{хх}$  и  $J_{кз}$ . Эффективность преобразования света в фотовольтаической ячейке  $\eta$  можно рассчитать по формуле:

$$\eta(\%) = (P_m / P_{св}) \times 100\% = [(J_m V_m) / P_{св}] \times 100\% = [(J_{кз} V_{хх} FF) / P_{св}] \times 100\%,$$

где  $P_{св}$  — мощность падающего света.

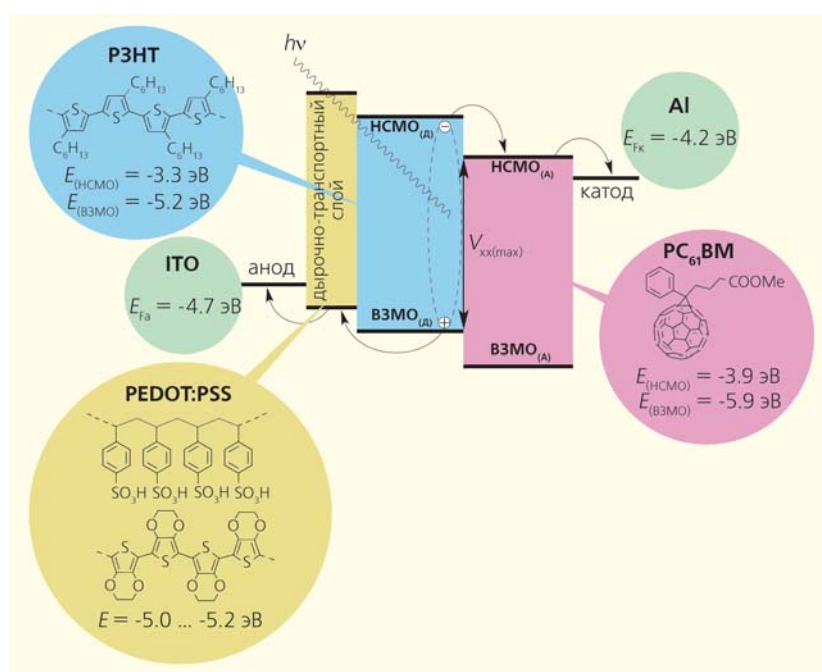


Рис.5. Схема работы органического фотоэлемента и используемые в нем материалы.

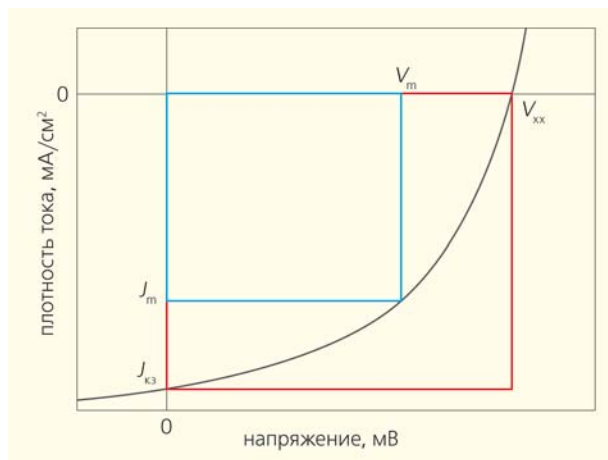


Рис.6. Вольтамперная характеристика фотоэлемента.

Следует отметить, что ВАХ фотоэлементов измеряют в стандартизованных условиях при 298 К и облучении светом со спектром, близким к АМ 1.5\*, для чего используется имитатор спектра солнечного света с мощностью светового потока 100 мВт/см<sup>2</sup> (что близко к максимальной мощности падающего на земную поверхность света в средних широтах). Значения вышеперечисленных параметров для рекордной на начало 2016 г. органической фотовольтаической ячейки на основе полимер-фуллеренового композита, сертифицированной в NREL, составляют  $V_{xx} = 0.79$  В,  $J_{кз} = 19.74$  мА/см<sup>2</sup> и  $FF = 0.735$ , что соответствует эффективности  $\eta = 11.5\%$  [1].

Одна из важнейших характеристик органического фотоэлемента — ширина запрещенной зоны используемых в нем органических полупроводников, для каждого из которых  $E_g = E_{(НСМО, А)} - E_{(ВЗМО, Д)}$ . По сути, она определяет минимальную энергию поглощенных фотонов из достаточно широкого солнечного спектра. Это следует из известного соотношения Планка, которое позволяет легко рассчитать значение  $E_g$  (в электронвольтах) из длины волны фотонов, соответствующих границе поглощения (в нанометрах):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow E_g \text{ (эВ)} \approx \frac{1240}{\lambda \text{ (нм)}}.$$

Поэтому чем меньше  $E_g$ , тем больше фотонов поглощается из солнечного спектра и тем бóльших значений  $J_{кз}$  можно ожидать при прочих равных условиях. В то же время при уменьшении  $E_g$  за счет повышения  $E_{(ВЗМО, Д)}$  либо повышения  $E_{(НСМО, А)}$  может снизиться рабочее напряжение фотоэлемента, в первом приближении ограниченное разницей  $V_{xx} \text{ (макс)} = E_{(НСМО, А)} - E_{(ВЗМО, Д)}$ . В итоге часто приходится сталкиваться с дилеммой: с одной стороны, уменьшение  $E_g$  необходимо для увеличе-

ния доли поглощенного солнечного излучения, а с другой — нужно иметь максимально большую разницу между  $E_{(НСМО, А)}$  и  $E_{(ВЗМО, Д)}$ , чтобы  $V_{xx}$  было максимальным. Поэтому для получения максимального КПД приходится искать оптимальные значения  $E_g$  используемых органических полупроводников, которые, исходя из теоретических расчетов, находятся в области 1.4–1.6 эВ [7]. При этом речь идет о подборе  $E_g$  донора, так как в большинстве случаев в качестве акцептора используются хорошо зарекомендовавшие себя производные фуллеренов. Последние, однако, также не лишены некоторых недостатков, связанных с их достаточно большой  $E_g$  (около 2 эВ) и деградацией в процессе работы органического фотоэлемента. Поэтому одним из быстро развивающихся направлений органической фотовольтаики стал поиск «нефуллереновых акцепторов», представляющих собой органические полупроводники с низким значением НСМО, которые могут играть роль акцепторов электронов в фотовольтаической ячейке [8].

Таким образом, работу органического фотоэлемента можно разделить на четыре основных этапа: поглощение квантов света активным слоем с образованием экситонов (1), диффузия экситонов к границе раздела фаз донора и акцептора (2), на которой происходит разделение экситонов на заряды (3), и транспорт зарядов к соответствующим электродам (4). Следовательно, итоговый КПД ячейки будет пропорционален произведению эффективностей процессов на каждой из этих стадий, где неизбежно возникают потери. На первой стадии они связаны с частичным отражением падающего света поверхностью полупрозрачного анода, с поглощением части световой энергии задним электродом (катодом), с переходом части световой энергии в тепло. Другие потери связаны с рекомбинацией экситонов, неполными генерацией и транспортом зарядов. Существуют омические потери на границе функциональных слоев и электродов, что эквивалентно наличию последовательного сопротивления. Наличие токов утечки, связанных с обратной диффузией носителей зарядов, присутствием ловушек зарядов, деформаций и неровностей активного слоя, и областей контактов слоев с электродами, наоборот, эквивалентно действию параллельного сопротивления. Для уменьшения таких потерь разрабатываются различные архитектуры органических фотоэлементов.

## Разнообразие конструкций

Активный слой первых органических фотоэлементов представлял собой последовательно нанесенные донорный и акцепторный компоненты (рис.7.а). Такая архитектура называется фотоэлементом с *планарным гетеропереходом*. Однако

\* АМ 1.5 — это воздушно-массовый коэффициент, характеризующий солнечный спектр, прошедший через 1.5 атмосферы.

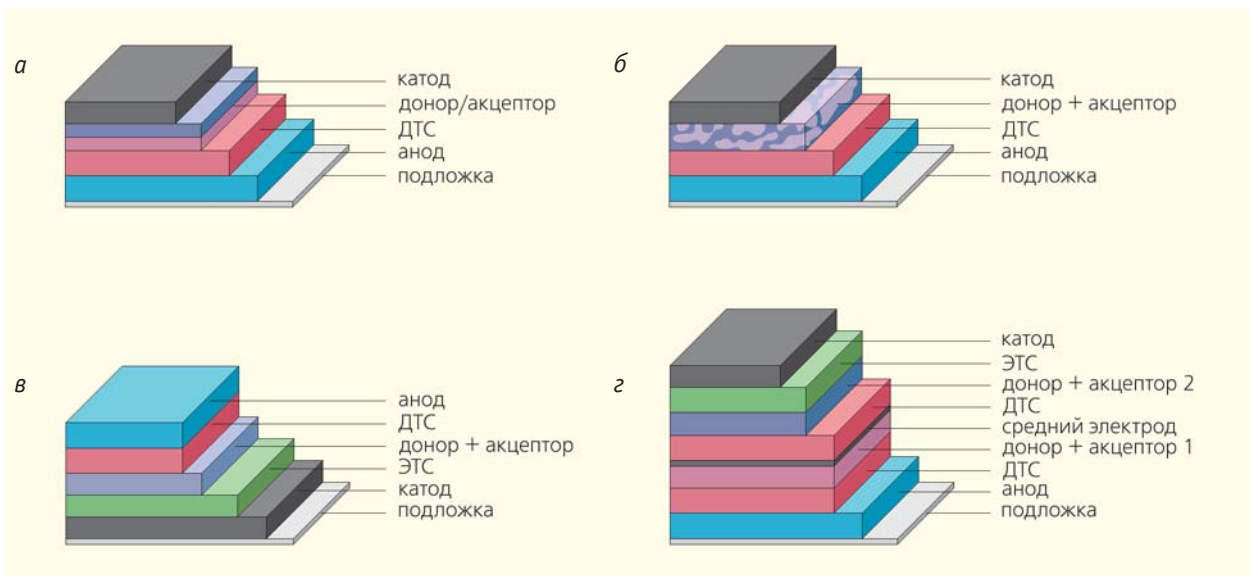


Рис.7. Различные архитектуры органических фотоэлементов: с планарным (а) и с объемным (б) гетеропереходом, инвертированный (в) и тандемный (г) типы. ДТС — дырочно-транспортный слой, ЭТС — электроно-транспортный слой.

КПД таких фотоэлементов довольно низок из-за недостаточно эффективных генерации и разделения зарядов, которые происходят только на границе раздела фаз донор—акцептор.

Лучшего разделения зарядов и, следовательно, большей эффективности удастся достичь в органических фотоэлементах с *объемным гетеропереходом* (рис.7,б), в которых донорный и акцепторный органические полупроводники смешиваются с образованием взаимопроникающей сетки фаз донора и акцептора, что позволяет намного увеличить площадь контакта между ними и уменьшить вероятность рекомбинации экситонов в объеме полупроводника. Однако зачастую простое смешивание двух органических материалов донорной и акцепторной природы не дает нужной морфологии активного слоя. В нем, с одной стороны, размеры доменов каждой из фаз должны быть соизмеримы с длиной диффузии экситонов, т.е. составлять 10–20 нм, а с другой стороны, каждая фаза должна быть непрерывной в пределах всей толщины слоя (100–300 нм), чтобы обеспечить возможность транспорта образовавшихся зарядов до соответствующего электрода (электрона — до катода, а дырки — до анода). Достичь нужной морфологии удастся с помощью подбора пар донор—акцептор с оптимальной совместимостью друг с другом и условий получения полупроводникового слоя (растворителя, концентрации, температуры и т.д.). При этом слишком плохая совместимость фаз нежелательна, так как дает домены бóльших, чем нужно, размеров, а слишком хорошая совместимость тоже не годится, поскольку при этом образуются маленькие домены, что не обеспечивает беспрепятственного транспорта зарядов к электродам. В последнее время

часто применяют и дополнительные приемы улучшения морфологии слоя с объемным гетеропереходом — использование смесей растворителей, небольших добавок высококипящих веществ, отжиг при повышенной температуре, отжиг в парах растворителя и др. [9].

Еще одна разновидность органических фотоэлементов — *инвертированный* фотоэлемент (рис.7,в). В архитектуре данного типа полярность электродов меняется на обратную: если в стандартной фотовольтаической ячейке на прозрачную подложку нанесен прозрачный анод, то в инвертированной ячейке — прозрачный катод. Такое обращение полярности достигается за счет применения в качестве катода прозрачных оксидов металлов с низкой работой выхода (например, чистого или допированного алюминием оксида цинка — ZnO, AZO, оксида молибдена MoO<sub>3</sub>) [10]. Так удастся избежать использования для катода металлов с низкой работой выхода (кальция или бария), которые легко окисляются и неустойчивы к действию внешней среды. Зато в качестве анода в инвертированной ячейке могут быть использованы стабильные металлы с высокой работой выхода (золото или серебро). Поэтому инвертированные ячейки более стабильны и долговечны, иногда даже без инкапсуляции.

Для преодоления потерь мощности, связанных с неполным поглощением солнечного света тонким активным слоем или узким спектральным диапазоном поглощения, было предложено использовать *тандемную архитектуру* фотоэлементов (рис.7,г). По сути тандемный фотоэлемент состоит из двух, соединенных последовательно, но содержащих активные слои, которые поглощают свет в разных участках солнечного спектра.

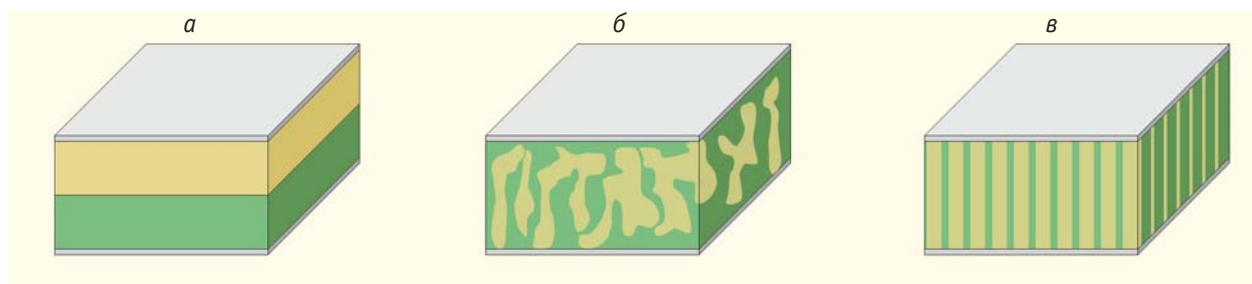


Рис.8. Фотоэлемент с планарным (а), объемным (б) и упорядоченным (в) гетеропереходами.

Увеличение эффективности в данном случае достигается за счет более полного поглощения солнечного света. Тандемные органические фотоэлементы уже достигли значений КПД 12%, и это далеко не предел. Возможны варианты тандемных схем с тремя последовательными фотоэлементами или фотоэлементами, соединенными параллельно. Основной недостаток устройств с последовательной схемой — сложность подбора подходящего среднего электрода, который должен собирать разноименные заряды с верхнего и нижнего фотоэлементов. Кроме того, такой материал должен хорошо пропускать свет. В качестве среднего электрода используют PEDOT:PSS,  $\text{TiO}_2$  и более сложные варианты: PEDOT:PSS/Au/ $\text{V}_2\text{O}_5$  или  $\text{TiO}_2$ :Cs/Al/Au. Еще одно немаловажное требование к среднему электроду — его поверхность должна быть очень гладкой и однородной, так как на нее необходимо наносить следующие слои.

Дальнейшие исследования в органической фотовольтаике сосредоточены на том, можно ли увеличить эффективность работы активного слоя. Как было сказано ранее, по архитектуре активного слоя более предпочтительны фотоэлементы не с планарным (рис.8,а), а с объемным (рис.8,б) гетеропереходом — из-за большей поверхности соприкосновения донорного и акцепторного слоев, однако подробные исследования структуры объемного гетероперехода с помощью современных методов электронной микроскопии, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализа показали, что расположение доменов в гетеропереходе имеет случайный характер, причем размер доменов трудно контролировать. Упорядочить структуру гетероперехода можно, используя различные наноматериалы: нанопроволоки, наностержни или наносетки (рис.8,в). Их получают различными методами: наноимпринтированием, низкотемпературным жидкофазным нанесением, темплатными методами, анодизацией или отжигом. Предпринимаются также попытки получения упорядоченного объем-

ного гетероперехода путем самоорганизации. В Институте синтетических полимерных материалов РАН получены звездообразные органические полупроводники на основе трифениламина и алкилдицианофирила, способные к образованию колончатых мезофаз [11]. Пока изготовленные из них в качестве донора и  $\text{PC}_{71}\text{BM}$  в качестве акцептора ячейки показали эффективность 4.0–5.4%, при этом есть большие возможности их дальнейшей оптимизации.

### Ячейки Гретцеля

Одним из прорывов в фотовольтаике считается изобретение в 1991 г. М.Гретцелем фотоэлементов, сенсibilизированных красителями, в англоязычной литературе известных как dye-sensitized solar cells (DSSC), впоследствии названных ячейками Гретцеля [12]. Их обычно также относят к органическим фотовольтаическим ячейкам, поскольку по крайней мере часть их компонентов органическая, они также являются экситонными и могут быть полупрозрачными (рис.9). Архитектура такого фотоэлемента кардинально отличается от всех рассмотренных выше (рис.9,а). В качестве активного слоя здесь выступает оксид титана, покрытый органическим красителем, хорошо поглощающим солнечный свет. Молекулы красителя, в качестве которого изначально использовали органические комплексы рутения, химически связаны с частицами  $\text{TiO}_2$ , широкозонного полу-

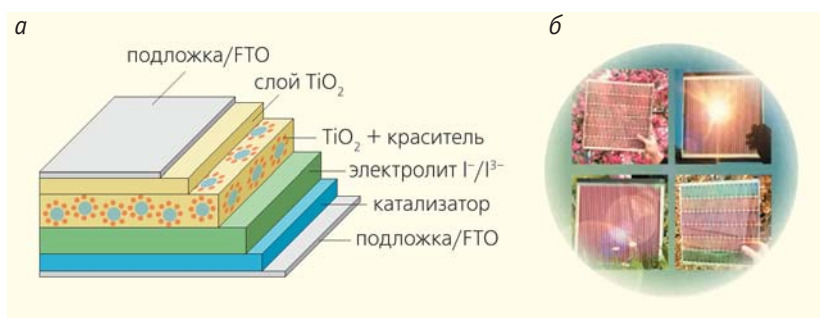


Рис.9. Архитектура ячейки Гретцеля (а) и образцы гибких фотоэлементов на ее основе (б).

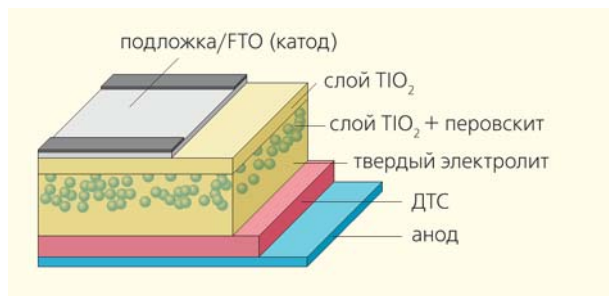


Рис.10. Фотоэлемент Гретцеля на основе перовскита. ДТС — дырочно-транспортный слой.

проводника, который сам по себе свет практически не поглощает. Таким образом, при поглощении кванта света краситель возбуждается и передает электрон через слой оксида титана на прозрачный катод, в качестве которого чаще всего используется FTO (сокращение от англ. fluorine-doped tin oxide — допированный фтором оксид олова). Однако затем необходимо вернуть молекулам красителя недостающий электрон, т.е. восстановить молекулу красителя. Для этого вводят слой жидкого электролита, в котором в равновесии присутствуют ионы  $I^-$  и  $I_3^-$ . Пройдя через слой электролита, электрон возвращается в молекулу красителя, замыкая тем самым цикл. По сути роль слоев  $TiO_2$  и электролита заключается в том, чтобы направить поток электронов только в одну сторону. Итак, ячейка Гретцеля — это единственное фотовольтаическое устройство, которое использует органические молекулы для поглощения фотонов и превращения их в электрические заряды без необходимости межмолекулярного транспорта электронного возбуждения. Только в них функции поглощения света и транспорта заряда разделены [13].

К настоящему времени КПД сертифицированных фотоэлементов Гретцеля достиг 11.9%, и про-

гресс в данном направлении продолжается [1]. Поскольку красители из рутениевых комплексов дороги и токсичны, идет поиск других подходящих органических и природных красителей. Правда, пока эффективность последних невысока. Например, ячейки Гретцеля на основе красителя, выделенного из традесканции и гранатового сока, показали эффективность 1.5%, а использование пигмента из красного турнепса позволило увеличить КПД до 1.7% [14]. Очевидно, такие фотоэлементы не могут конкурировать с фотоэлементами на основе химически синтезированных красителей, однако был создан прецедент для поиска природного сырья с целью использования в фотовольтаике. Успехи на пути замены рутениевых комплексов органическими красителями более существенны — так, эффективность ячейки Гретцеля с красителем на основе трифениламина и цианоуксусной кислоты достигает 9.8% [15], а краситель на основе трифениламинового производного порфирина позволил повысить ее до 13% [16]. Недавно за счет использования комбинации органических красителей с карбоксильными и алкоксисилильными функциональными группами удалось поднять КПД ячеек Гретцеля до 14% [17].

Огромным прорывом в современной фотовольтаике можно считать открытие перовскитных солнечных батарей. Перовскиты представляет собой вид гибридных металлоорганических соединений состава  $ABX_3$ , где А — органический амин, например метиламин ( $CH_3NH_2$ ), В — металл (свинец или олово), а X — анион галогена ( $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$ ). Обладая узкой запрещенной зоной ( $E_g < 1.5$  эВ), отличными спектральными характеристиками и амбиполярностью, перовскиты привлекают все большее внимание исследователей. На базе перовскитов возможно изготовление фотоэлемента Гретцеля (рис.10), где эти материалы служат в качестве светопоглощающего компонента.

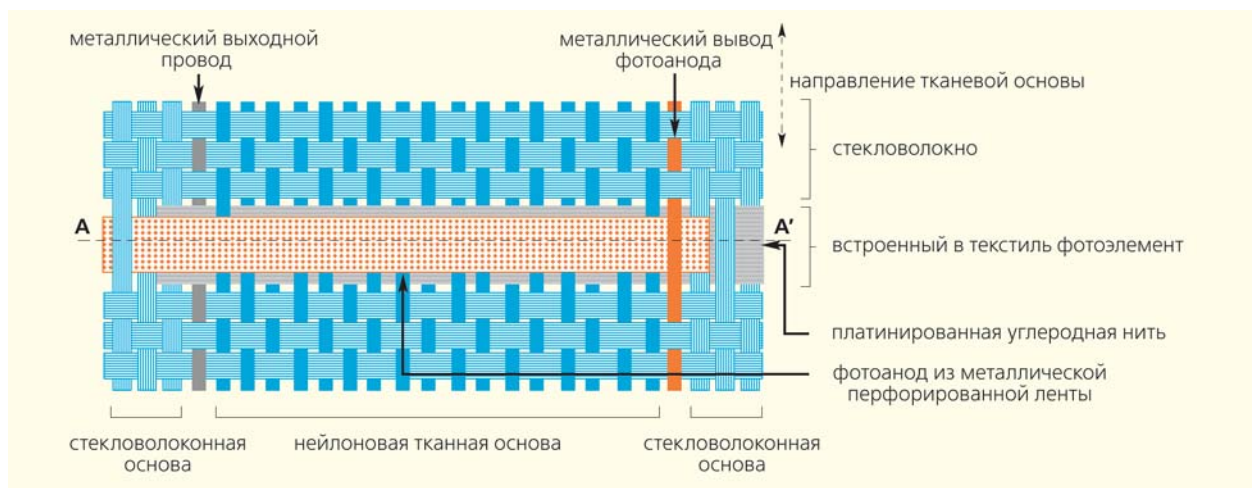


Рис.11. Фрагмент ткани с внедренным в нее фотоэлементом Гретцеля.

Несмотря на первоначально весьма скромный КПД = 3.8% в 2009 г. [18], причиной чего считают использование жидкого электролита, замена его на твердый аналог, а также подбор оптимальных методов нанесения материалов и использование дополнительных дырочно-транспортных слоев позволили за последние несколько лет повысить КПД подобных фотовольтаических ячеек до 15% [19]. Кроме ячеек Гретцеля на основе перовскитов изготавливаются фотоэлементы с планарным гетеропереходом, КПД которых сегодня уже превысил 20% [1]. Оптимизация технологии нанесения активного слоя, а также применение дополнительных электроно-транспортных и дырочно-транспортных слоев позволит достигнуть еще большего прогресса в ближайшем будущем. Перовскитные солнечные батареи уже выделились в отдельное направление исследований.

Сейчас наметились сдвиги в разработке фотовольтаических тканей, необходимых для внедрения солнечных батарей в одежду, головные уборы, сумки. Ранние попытки формования фотовольтаического волокна обычными методами и создание из него тканых материалов к успеху не привели из-за высокого трения между волокнами, вызывающего их быстрый износ и разрушение. Эту проблему удалось решить, используя технологию вплетения фотовольтаического волокна в основную структуру ткани: нагрузки на такие волокна оказались минимальными. В качестве фотовольтаического волокна служили фрагменты на основе фотоэлементов Гретцеля (рис.11) [20]. Тестирования таких фотовольтаических тканей показали значения КПД 2.6%, что внушает оптимизм в отношении дальнейших исследований в данном направлении.

\* \* \*

В заключение отметим, что в последние годы в органической фотовольтаике наблюдается значительный прогресс, связанный с получением

высокоэффективных функциональных материалов, с разработкой новых технологий и архитектур фотоэлементов, позволяющих повысить их КПД. Уже сейчас доступны гибкие органические солнечные батареи (рис.12), энергии которых хватает для зарядки различных портативных устройств. В целях популяризации органических фотоэлементов в 2013 г. факультет преобразования и хранения энергии Датского технического университета (DTU Energy) проводил акцию, в ходе которой каждому зарегистрировавшемуся на сайте бесплатно высылали образец солнечной батареи, названной freeOPV [21]. А на выставке «PV Expo 2013» в Токио были продемонстрированы первые прототипы фотовольтаических окон на основе фотоэлементов Гретцеля. Однако в настоящее время применение органических фотоэлементов только начинается, и для их массового внедрения предстоит решить ряд проблем. В-первых, необходима разработка новых функциональных материалов, более эффективно поглощающих солнечный свет не только в видимой, но и в ИК-области. Сегодня также осуществляются попытки замены фуллереновых акцепторных производных на аналоги с лучшей совместимостью с донорными материалами, с более эффективным поглощением света и более коммерчески привлекательные. Во-вторых, поскольку важнейший фактор для повышения КПД фотоэлемента — оптимизация его архитектуры, нужно искать более эффективные материалы для полупрозрачного анода. В настоящее время практически во всех типах фотоэлементов используется ITO или FTO, обладающие определенными недостатками: высокой стоимостью из-за присутствия малораспространенного в природе индия, дорогостоящей технологией нанесения на подложки, хрупкостью и недостаточной стойкостью в условиях эксплуатации. В-третьих, существенно понизить стоимость органических солнечных батарей

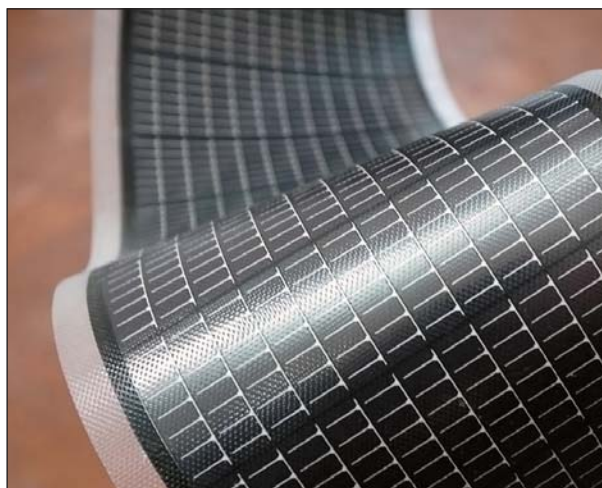
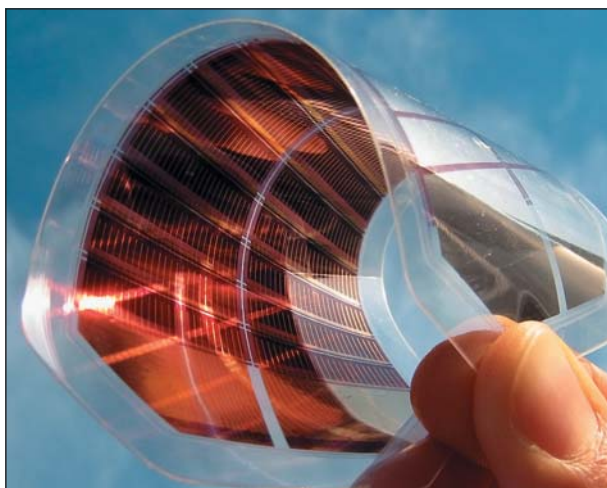


Рис.12. Гибкие органические солнечные батареи.

можно было бы благодаря высокопроизводительным и малозатратным технологиям для рулонного производства, масштабное внедрение которых пока не произошло. В-четвертых, известной проблемой остается ограниченное время жизни органических фотоэлементов, которое связано с побочными процессами, происходящими в условиях эксплуатации: с окислением контактов и активного слоя кислородом воздуха и парами

воды, с фото- и термодеструкцией активного слоя. Избежать таких процессов можно, используя технологии инкапсуляции фотоэлементов инертными и прозрачными для солнечного света материалами, а также путем разработки новых, более стабильных, органических полупроводников, эффективно поглощающих солнечный свет в широком спектральном диапазоне. История только начинается! ■

**Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда (проект 14-13-01380).**

## Литература

1. Green MA, Emery K, Hisbikawa Y. et al. Solar cell efficiency tables (version 47) // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2016. V.24. P.3–11.
2. Shockley W., Queisser HJ. Detailed balance limit of efficiency of *p-n* junction solar cells // J. Appl. Phys. 1961. V.32. P.510–519.
3. Noriega R., Saleo A. Charge transport theories in organic semiconductors // Organic Electronics II / Ed. H.Klauk. Weinheim, Germany, 2012. P.67–104.
4. Gregg V.A. Excitonic solar cells // J. Phys. Chem. B. 2003. V.107. №20. P.4688.
5. Агина Е.В., Пономаренко С.А., Музафаров А.М. Макромолекулярные системы с проводимостью *p*-типа // Изв. Акад. наук. Сер. Хим. 2010. №6. С.1059–1077.
6. Lövenich W. PEDOT — properties and applications // Polymer Sci. Ser. C. 2014. V.56. P.135–143.
7. Zhou H., Yang L., Stoneking S., You W. A weak donor-strong acceptor strategy to design ideal polymers for organic solar cells // Appl. Mater. Interfaces. 2010. V.2. P.1377–1383.
8. Труханов В.А., Паращук Д.Ю. Нефуллереновые акцепторы для органических солнечных батарей // Высокомол. соедин. Сер. С. 2014. Т.56. С.76–88.
9. Huang Y., Kramer E.J., Heeger A.J., Bazan G.C. Bulk heterojunction solar cells: morphology and performance relationships // Chem. Rev. 2014. V.114. №14. P.7006–7043.
10. Klein A., Korber C., Wachau A. et al. Transparent conducting oxides for photovoltaics: manipulation of Fermi level, work function and energy band alignment // Materials. 2010. V.3. P.4892–4914.
11. Ponomarenko S.A., Luponosov Y.N., Min J. et al. Design of donor-acceptor star-shaped oligomers for efficient solution-processible organic photovoltaics // Faraday Discuss. 2014. V.174. P.313–339.
12. O'Regan B., Gratzel M. A low-cost, high efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films // Nature. 1991. V.335. P.737.
13. Gratzel M. Recent advances in sensitized mesoscopic solar cells // Acc. Chem. Res. 2009. V.42. №11. P.1788–1798.
14. Jinchu I., Sreekala C.O., Sreelatha K.S. Dye-sensitized solar cell using natural dyes as chromophores — Review // Mater. Sci. Forum. 2014. V.771. P.39.
15. Zhang G., Bala H., Cheng Y. et al. High efficiency and stable dye-sensitized solar cells with an organic chromophore featuring a binary *p*-conjugated spacer // Chem. Commun. 2009. P. 2198–2200.
16. Matbew S., Yella A., Gao P. et al. Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers // Nature Chem. 2014. V.6. P.242.
17. Kakiage K., Aoyama Y., Yano T. et al. Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes // Chem. Commun. 2015. V.51. P.15894–15897.
18. Kojima A., Teshima K., Shirota Y., Miyasaka T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells // J. Am. Chem. Soc. 2009. V.131. P.6050.
19. Burschka J., Pellet N., Moon S.-J. et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells // Nature. 2013. V.499. P.316–320.
20. Yun M.J., Cha S.I., Seo S.H. et al. Insertion of dye-sensitized solar cells in textiles using a conventional weaving process // Sci. Rep. 2015. V.5. P.11022.
21. Krebs F.C., Hasel M., Corazza M. et al. Freely available OPV — the fast way to progress // Energy Technol. 2013. V.1. P.378.



# След космической катастрофы: первая регистрация гравитационных волн

В.Н.Руденко

Произошло событие, которого физики и астрономы ждали пятьдесят лет, — прямая регистрация гравитационного сигнала, пришедшего к нам из глубин Вселенной. Это случилось на фоне растущей иронии скептиков (напрасные траты средств, «погоня за химерой», «алхимия нашего века») и сомнений части апологетов (гравитационное излучение существует, но столь слабое, что практического информационного значения иметь не будет). Есть электромагнитные волны, на которых большие оптические и радиотелескопы принимают сигналы от сверхновых звезд и квазаров, находящихся почти на окраине видимой Вселенной, — вот и достаточно для ее познания. Можно еще пополнить арсенал детекторами космических лучей и нейтрино (как сказал поэт: «Чего ж вам боле?»). Между тем событие, о котором идет речь, — слияние двойной черной дыры, проявило себя, послав сигнал только в виде гравитационного излучения или, на высоком научном языке, — «на волнах пространства-времени» [1]. Удача, что человечество в этот момент оказалось с нужным инструментом в руках — он был включен и сработал. Однако расскажем обо всем по порядку.

© Руденко В.Н., 2016



**Валентин Николаевич Руденко**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом гравитационных измерений Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ им.М.В.Ломоносова, руководитель проекта OGRAN Института ядерных исследований РАН. Область научных интересов — радиофизика, гравитация, астрофизика.

**Ключевые слова:** гравитационное излучение, детекторы гравитационных волн, гравитационно-волновые интерферометры, релятивистские звезды.

**Key words:** gravitational radiation, detectors of gravitational waves, gravitational-wave interferometers, relativistic stars.

## О чем речь

Формально считается, что гравитационные волны теоретически предсказаны Эйнштейном как одно из следствий Общей теории относительности (ОТО). Но фактически мысль об их существовании напрашивается уже в Специальной теории относительности (СТО) — в результате отказа от ньютоновского принципа дальнего действия в гравитации и перехода к принципу конечной скорости взаимодействий. Гравитационное поле (поле сил притяжения), создаваемое некоторой массой, уже не может мгновенно образоваться во всем окружающем пространстве. На это должно уйти время, зависящее от скорости распространения гравитационного взаимодействия и расстояния до точки наблюдения. Иными словами, некая «гравитационная волна» должна принести информацию о появлении производящей поле массы в заданную точку наблюдения. Что это за волна, какое будет поле? Ответы уже зависят от специфики конкретной теории, в частности ОТО [2]. Но принципиальный вывод о наличии гравитационных волн фактически содержится в любом более-менее корректном варианте релятивистской теории тяготения.

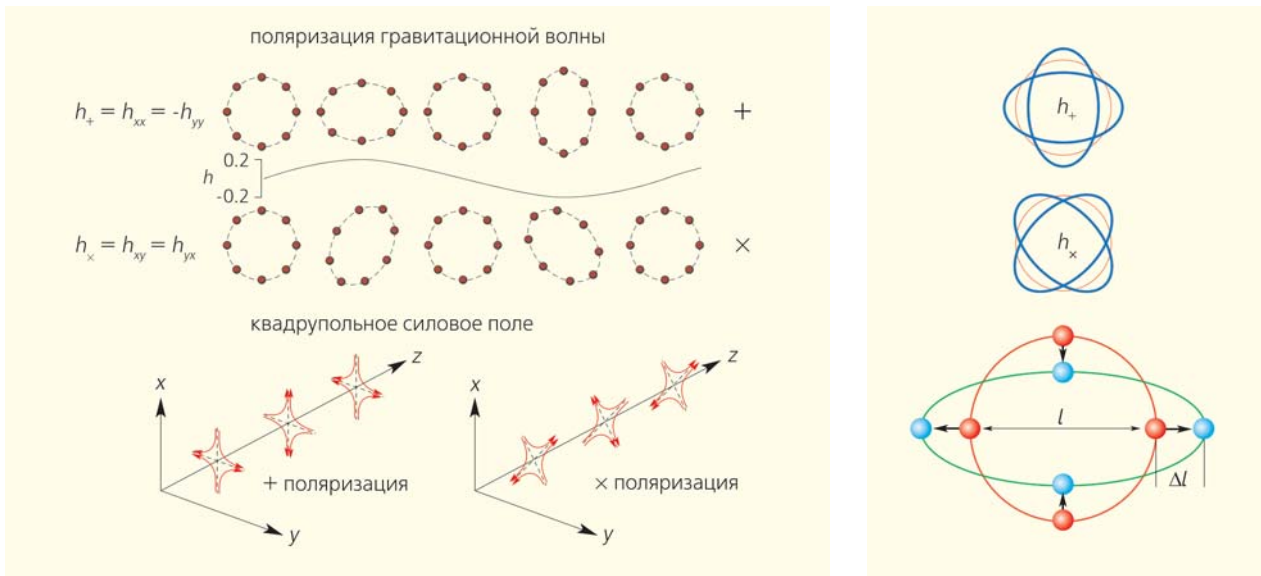


Рис.1. Иллюстрации к понятию «поле относительных ускорений гравитационных волн». Стрелками отмечены направления силовых линий поля; смещения пробных масс (точек) показаны для двух возможных поляризаций плоской волны («плюс» и «крест»). Виден «приливной» характер возникающих деформаций.

В ОТО гравитационные волны поперечные, и в плоскости, нормальной распространению волны, ее гравитационное поле порождает относительные ускорения попавших в него пробных частиц, описываемые картинкой «силовых линий» крестообразной (x) либо плюсообразной (+) формы (рис.1). Это отражает факт отсутствия отрицательного гравитационного заряда и отвечает двум возможным поляризациям плоской гравитационной волны; одна поляризация переходит в другую при повороте на  $45^\circ$  (что на квантовом языке соответствует «спину 2 для гравитона» в отличие от «спина 1 для фотона»). В остальном, кажется, волны как волны, — распространяющееся поле гравитации, — математически представленные функцией координат и времени.

Есть, однако, очень важная специфика гравитационного поля, которая формулируется как «принцип эквивалентности» (ПЭ) и представляет физический факт независимости динамической реакции пробного тела в гравитационном поле от величины его массы. Это на «школьном языке» описывается как принцип (если не закон) Галилея: на Земле все тела падают с одним и тем же ускорением. Есть и другие формулировки, но в конце концов ПЭ приводит к эквивалентности понятий гравитации и геометрии пространства. Действительно, все равно, что именно определяет траекторию пробной частицы: силы тяготения или (в их отсутствие) геометрическая структура пространства, по геодезическим линиям которого только и могут перемещаться пробные частицы. При формальном описании динамики реального трехмерного мира как эволюции точки (мировой линии) в четырехмерном пространстве (четвертая координата —

время) мы можем говорить о гравитационных волнах как о возмущениях геометрии четырехмерного мира или, что было вполне таинственно упомянуто выше, как о «волнах пространства-времени».

Материя Вселенной через гравитацию формирует геометрию Мира, меняющуюся с временной шкалой в миллиарды и десятки миллиардов лет. На этом квазистатическом «сглаженном фоне» «живет» стохастическая высокочастотная «рябь геометрии» — гравитационные волны, порождаемые локальными катаклизмами материи и информационно связывающие различные мировые точки. Сверхзадачей для астрофизики нашего века стало сначала научиться перехватывать эту информацию, а затем умудриться ее расшифровать.

### Чего ждем

Что же такое «амплитуда гравитационной волны», производящей «возмущение пространства-времени»? В безразмерной форме она должна представляться меняющимся во времени (осциллирующим для гармонической волны) полем относительных смещений, иначе — деформаций  $h$ , или на языке дифференциальной геометрии — динамических «вариаций метрики пространства», в которое как бы погружен детектор. Энергия волны, которая при этом тратится на возбуждение (раскачку) детектора, должна быть пропорциональна квадрату метрических вариаций и некоторой «эффективной площади приема» — характеристики детектора [2]. При пересчете в обратном направлении к источнику, рассматриваемому как изотропный сферический излучатель, удельная энергия долж-

на быть умножена на  $4\pi r^2$ , где  $r$  есть расстояние до источника. Естественно, источник не может выдать энергии больше, чем его энергия покоя  $Mc^2$  ( $M$  — масса,  $c$  — скорость света), скорее, в излучение уйдет какая-то доля. Какая именно, зависит от конкретного динамического процесса или «катаклизма», испытываемого источником.

Составить представление об амплитуде астрофизических гравитационных волн по порядку величины можно уже из геометрических соображений. Закон тяготения Ньютона определяет гравитационный потенциал  $\phi$  (гравитационную энергию) на поверхности сферического тела массы  $M$  и радиуса  $R$  как  $\phi = GM/R$ . Отношение собственной гравитационной энергии тела  $M\phi$  к его энергии покоя дает безразмерный параметр «слабости поля»  $\phi/c^2 = GM/Rc^2 \sim r_g/R \leq 1$ , где  $G$  — гравитационная постоянная Ньютона, а  $r_g$  — так называемый гравитационный радиус массы  $M$  (фактически это величина массы, выраженной в единицах  $G/c^2$ ).

При таком описании ясно, что большей гравитационной энергией будут обладать источники с радиусом порядка гравитационного  $R \approx r_g$ . Такие объекты в астрофизике называются релятивистскими или сверхплотными звездами. Обычные звезды — это объекты со слабым полем: например, Солнце имеет  $r_g \sim 3$  км и  $r_g/R \sim 10^{-6}$ . В гравитационные волны значительную долю энергии могут трансформировать только релятивистские звезды [2]. Чтобы излучение было мощным, эта энергия должна высвободиться за кратчайшее время. Соответствующая длительность импульсного динамического процесса, катаклизма, не может быть короче, чем  $R/c \approx r_g/c$ . Для сверхплотного объекта солнечной массы такие времена составляют порядка  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  с; при этом процесс идет со скоростями, близкими к световой. Таким образом, эффективный гравитационный излучатель должен быть полностью релятивистским, т.е. не только по величине гравитационного поля, но также и по скорости динамики катаклизма. Говоря простыми словами, это взрывные процессы сверхплотных звезд.

Вернемся к оценке амплитуды гравитационной волны, возбуждающей наземный детектор. Величина деформаций, «искривляющих пространство» на поверхности источника,  $h_0 \sim r_g/R$ . Распространяясь от источника, волна теряет амплитуду обратно пропорционально пройденному расстоянию. Отсюда ожидаемая амплитуда на поверхности Земли будет  $h \sim (r_g/R) \cdot (r_g/r)$ . Для нейтронной звезды ( $r_g/R \sim 0.1$ ), образовавшейся в центре нашей Галактики ( $r \sim 10$  кпк) в результате взрыва сверхновой, получается оценка амплитуды гравитационно-волнового всплеска  $h \sim 10^{-18}$ . Такого порядка будет относительное изменение расстояния ( $h = \Delta l/l$ ) между двумя свободными пробными частицами, индуцированное подобным всплеском. Если источник расположен дальше, например в скоплении галактик Вирго ( $r \sim 15$  Мпк), ожидаемые амплитуды ре-

дуцируют к границе  $10^{-21}$  и меньше. Итак, «геометрический эффект», производимый гравитационными волнами, оказывается ничтожно малым. Возможность регистрации такого эффекта требует специального исследования.

В этих условиях, казалось бы, надо рассчитывать на близкие источники. К сожалению, релятивистские звезды, да еще и в момент катастроф, появляются не слишком часто. Событие типа вспышки сверхновой имеет вероятность  $10^{-2}$  для одной галактики в течение года. Однако не каждая сверхновая рождает нейтронную звезду, излучающую гравитационно-волновой всплеск. Такой «надежный излучатель», как катастрофа слияния сверхплотных компонент релятивистской двойной звезды в конце ее «орбитальной» жизни ( $\sim 10^8$  лет), в самом оптимистическом варианте имеет вероятность  $10^{-4}$  на галактику в год. Чтобы набрать приемлемую «частоту» событий (темп появления гравитационно-волновых сигналов), надо рассматривать большой объем Вселенной, зоны с максимальной плотностью галактик, звездных скоплений и др.

Простые оценки показывают, что при ориентации на гравитационно-волновую амплитуду в  $10^{-21}$  и приемлемую частоту  $\sim 10$  шт./год зона наблюдения имеет радиус  $\sim 10$ – $20$  Мпк, т.е. включает кластер Вирго. Кроме «сверхновых» и «слияния релятивистских двойных» еще одним мощным импульсным источником могут быть «коллагсары», т.е. катастрофы типа сжатия в черную дыру звезд, превысивших критическую массу. Однако и для таких событий сохраняется приведенная выше оценка главных параметров гравитационно-волнового сигнала — его амплитуды и частоты появления.

## Как регистрируем

Перейдем к детекторам. Пионером гравитационно-волнового эксперимента стал Дж.Вебер, профессор Мэрилендского университета (США). Он создал первый гравитационный детектор, который теперь можно видеть в одном из залов Смитсоновского музея в Вашингтоне. Упрощенно, это алюминиевая цилиндрическая болванка массой  $m = 1.2$  т и длиной  $l = 1.5$  м. Вебер резонно полагал, что поле относительных ускорений, переносимых гравитационным излучением, должно вызвать акустические волны в теле детектора, резонансно усиленные по амплитуде при соответствующем совпадении частот. Для регистрации акустических вибраций детектора использовались пьезодатчики, приклеенные на его цилиндрической поверхности (рис.2). Веберу удалось довести чувствительность до уровня собственных тепловых («бруновских») шумов детектора, т.е. регистрировать колебания с амплитудой  $\Delta x$ , энергия которых была порядка тепловой  $kT$ :  $m\omega^2(\Delta x)^2 \approx kT$ . При комнат-



Рис.2. Джозеф Вебер с первым гравитационно-волновым детектором — твердотельным алюминиевым акустическим резонатором («болванкой» длиной 1.5 м, весом 1.2 т, с акустической частотой 1.6 кГц).

ной температуре на резонансной частоте детектора  $\omega = 10^4$  рад/с получим амплитуду  $\Delta x \sim 10^{-14}$  см и, соответственно, деформацию  $h = \Delta x/l \sim 10^{-16}$ . Это на два порядка грубее, чем теоретически требуется для регистрации излучения от источника в центре Галактики. Тем не менее Вебер провел в 1968–1972 г. серию наблюдений на паре пространственно разнесенных детекторов (Чикаго—Мэриленд), пытаясь выделить случаи их одновременного срабатывания, т.е. «совпадений». Вот этот прием — поиск совпадений (фактически заимст-

вованный из экспериментов в ядерной физике) — и сегодня остается практически единственной методикой, позволяющей отличить эффект глобального воздействия на детекторы от их разнообразных локальных возмущений (которые суть следствие неидеальной изоляции детектора). Только совместные события могут быть кандидатами на гравитационные сигналы. Хотя Вебер отмечал наличие таких событий в своих наблюдениях, их статистическая значимость была воспринята критически. Более того, антенны, аналогичные веберовским, были построены в России, и в экспериментах, проведенных совместно сотрудниками МГУ (Физический факультет) [3] и РАН (Институт физики Земли) в 1972–1975 г. результаты Вебера не нашли подтверждения. Однако старт гравитационно-волнового эксперимента состоялся!

Дальнейшее его развитие пошло в направлении увеличения чувствительности детекторов веберовского типа и разработки новых детекторов — лазерных гравитационных интерферометров «на свободных массах». Основной вклад в развитие твердотельных детекторов внесли итальянские ученые под руководством профессора Римского университета Г.Пицелла. С помощью развитой ими техники глубокого охлаждения больших пробных масс они смогли построить три криогенных детектора (акустических резонатора) с массами 2.3 т, охлажденными до температуры 2 К. Спектральная плотность собственного деформационного шума этих детекторов падала до уровня ниже  $10^{-21}$  в частотной полосе 1 Гц. К сожалению, сама полоса приема таких резонансных антенн была узкой, в лучшем случае она достигала 20–30 Гц вокруг резонансной частоты  $\sim 1$  кГц. Эти антенны («Explorer» в Женеве, «Nautilus» в Риме и «Auriga» в Падуе, рис.3) проработали несколько лет в схеме совпадений, но зарегистрировать достоверные гравитационно-волновые сигналы из космоса им не удалось, хотя подозрительных кандидатов на такие сигналы было довольно много.

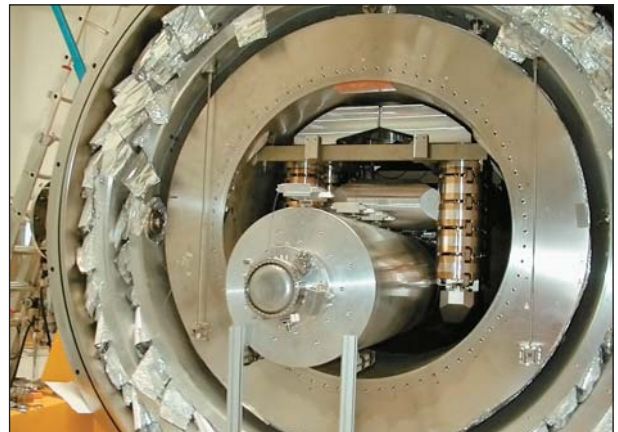


Рис.3. Криогенные твердотельные гравитационно-волновые антенны «Nautilus» (слева) и «Auriga» (справа). Криостат «Nautilus» закрыт; внутренняя конструкция криостата и подвеска детектора показаны для «Auriga».

Надо сказать, что радиофизики в процессе своей работы над увеличением чувствительности гравитационных детекторов получили неожиданную моральную поддержку от астрофизиков. Последние, в результате длительного слежения за динамикой релятивистской двойной звезды PSR 1213+16 с пульсаром в качестве одного из компонентов, обнаружили перманентное сокращение ее орбитального периода. Скрупулезный анализ данных, накопленных за 25 лет, показал удивительно точное совпадение наблюдаемой динамики изменения периода с теоретической кривой, рассчитанной с учетом потерь энергии на гравитационное излучение. Требуемые для расчета массы компонент двойной были при этом определены экспериментально за счет измерения классических релятивистских эффектов (смещения периастра, гравитационной задержки радиосигналов и др.), величина которых в сильном гравитационном поле нейтронных звезд увеличивается на несколько порядков. Так было представлено косвенное доказательство реальности существования гравитационного излучения в природе. Авторы открытия, Дж.Тейлор и Р.Халс, получили Нобелевскую премию по физике 1993 г., а инженеры-исследователи, занятые разработкой и созданием гравитационных антенн, — новое вдохновение в их изнурительном труде по повышению чувствительности детекторов.

Идея антенны на свободных массах естественно приходит при внимательном взгляде на математическую запись «вариаций метрики» как относительных пространственных деформаций:  $h = \Delta l/l$ . Понятно, что малое значение  $h$  достигается двумя путями: требуется измерять очень малые изменения расстояния между двумя точками (места расположения пробных масс) или расстояние между этими точками должно быть большим; конечно, возможно и то, и другое сразу. Отсюда ясно, что надо делать протяженный детектор с эффективным масштабом в километры вместо метров (как у веберовского детектора). Но тогда он уже не может

быть неким сплошным твердым телом. Это могут быть пробные массы, расстояние между которыми контролируется (измеряется) с помощью электромагнитных волн, например, лазерного излучения.

Использовать оптический интерферометер майкельсоновского типа в качестве детектора гравитационных волн впервые предложили советские ученые М.Е.Герценштейн и В.И.Пустовойт, опубликовав соответствующую статью в ЖЭТФ в 1962 г. [4]. Они исходили из понимания, что взаимодействие гравитационной волны со светом как релятивистским объектом должно быть более эффективным, чем с пробным твердым телом, и описали это взаимодействие как эквивалентное «гравитационное» изменение оптического показателя преломления среды интерферометра. Затем американский профессор Р.Вайс дополнил эту схему идеями маятниковой подвески зеркал и увеличения эффективной длины плеч интерферометра за счет многократных отражений оптического луча от пробных масс-зеркал в каждом из плеч. Так, пробежав плечо в 3 км туда-обратно 100 раз, луч как бы соединит пробную пару с базой в 300 км. Если за время пробега луча знак гравитационного поля ускорений, переносимого волной, сохраняется, измеряемая величина деформации будет увеличена в 100 раз. Условие сохранения знака поля простое: эффективная длина плеч не может превышать половину длины гравитационной волны. Для частоты гравитационной волны 1 кГц этот масштаб как раз равен 300 км (говоря радиотехническим языком, антенна оказывается согласованной с принимаемым излучением).

Строительство таких интерферометров, весьма дорогостоящее предприятие, было выполнено в последние годы в США (проект LIGO — Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, рис.4) и в Европе (итало-французский проект VIRGO — Very large InterferometereR Gravitational Observatory). К настоящему времени закончена их модернизация с целью увеличения чувствительности до зна-



Рис.4. Вид с высоты птичьего полета на американские детекторы гравитационных волн — интерферометры с четырехкилометровыми плечами LIGO (слева — в Хэнфорде, справа — в Ливингстоне).

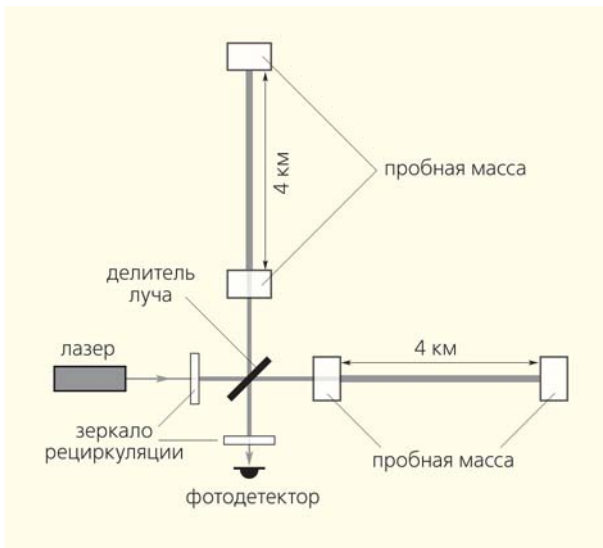


Рис.5. Структурная схема интерферометров LIGO: конструкция «майкельсоновской» конфигурации усложнена резонаторами Фабри—Перо в больших плечах и зеркалом рециркуляции между лазером и делителем луча. Мощность входного луча 20 Вт, мощность в плечевых резонаторах 100 кВт.

чений  $10^{-22}$ – $10^{-23}$  Гц<sup>-1/2</sup>. Ключевое инженерное решение было найдено как комбинация двухплечевого интерферометра Майкельсона с оптическими резонаторами Фабри—Перо, рис.5. Фактически каждое из простых зеркал в плечах «майкельсона» было заменено более сложным двойным зеркалом — эталоном Фабри—Перо (прибором с многократными отражениями, или многопроходным). Число проходов туда-обратно в нем описывается специальным параметром — резкостью  $F$  (от франц. finesse — точность), который приблизительно связан с коэффициентом отражения зеркал  $F = 2(1 - R)^{-1}$ , т.е. при  $R = 0.98$ , число проходов  $F = 100$  и т.д. Все элементы интерферометра: зеркала, делитель луча, а также источник оптической мощности (лазер), подвешиваются на специальных антисейсмических фильтрах (при этом характерная маятниковая частота подвесок оказывается порядка 1 Гц) и размещаются в трубах с высоким вакуумом. Получить интерференцию на подвесных зеркалах — задача непростая, и без специальных следящих систем тут не обойтись. Весь этот гигантский интерферометр опутан сложными электронными системами обратных связей, удерживающих зеркала в рабочей точке для реализации интерференции. Требуемая точность удержания — примерно одна миллионная часть интерференционной полосы микрометровой ширины!

Для частот, хотя бы на порядок превышающих маятниковую частоту подвесок, т.е. начиная с 10 Гц и выше, массы-зеркала могут считаться практически свободными. Их реакция на поле гравитационной волны не зависит от ее частоты и определяется только амплитудой метрических вариаций. Это

означает, что интерферометрическая антенна есть широкополосный приемник в отличие от твердотельных резонансных детекторов. При взаимном относительном смещении масс-зеркал ее выходной сигнал появляется как возмущение стационарной интерференционной картины, т.е. как вариации освещенности, регистрируемые фотодиодом. Чувствительность определяется естественными шумами, среди которых главными будут тепловой шум подвесок, ограничивающий точность измерений на низких частотах (грубо, ниже 10 Гц), и оптический фотонный шум лазерной накачки. Последний в принципе частотно-равномерный, но из-за падения механооптического коэффициента передачи с повышением частоты гравитационного сигнала (выше 100 Гц) этот шум ослабляет чувствительность на высоких частотах. В итоге, хотя интерферометрическая антенна и широкополосная, ее зона наилучшего приема занимает конечную область спектра частот между десятками герц и несколькими килогерцами с минимумом спектральной шумовой амплитуды (максимальной чувствительностью) в районе 100 Гц. Этот минимум для модернизированных установок LIGO и VIRGO должен составить  $\sim 5 \cdot 10^{-23}$  Гц<sup>-1/2</sup>. Установки LIGO на практике уже почти достигли этого уровня. На килогерцевых частотах шумовые характеристики существующих интерферометрических и резонансных твердотельных антенн близки к уровню  $\sim 10^{-21}$  Гц<sup>-1/2</sup>. График спектральной плотности деформационного шума модернизированного интерферометра LIGO изображен на рис.6.

Прежде чем перейти к анализу заявления о первой регистрации гравитационно-волнового сигнала на антеннах LIGO, рассмотрим стратегию этой регистрации.

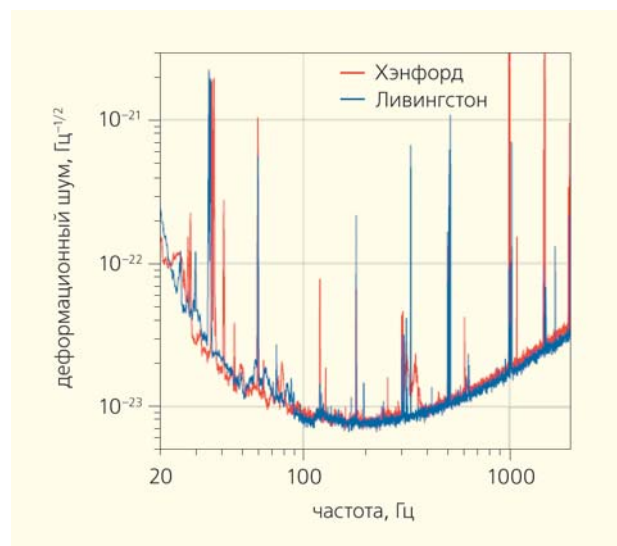


Рис.6. Спектральная плотность шума интерферометров LIGO после модернизации [1]. Высокие пики — струнные резонансы подвесок зеркал, при обработке отфильтровываются.

### Что и как ищем

Перечислим основные научные программы, которые реализуются в многочисленных сеансах наблюдений на больших гравитационно-волновых интерферометрах. По-крупному их четыре: поиск гравитационно-волновых сигналов от сливающихся двойных релятивистских (сверхплотных) звезд; поиск сигналов от вспышек сверхновых звезд с образованием сверхплотного остатка; регистрация непрерывного почти монохроматического излучения от пульсаров (вращающихся нейтронных звезд) и регистрация стохастического гравитационно-волнового фона, отделившегося от первородной плазмы (праматерии Вселенной) в процессе Большого взрыва. Однако из всех четырех абсолютно надежен (гарантированно существует) только первый класс источников гравитационных волн.

Действительно, вспышка сверхновой может пройти и без образования коллапсирующего сверхплотного ядра в центре оболочки, расширяющейся в межзвездную среду. Более того, даже при наличии центрального коллапса гравитационное излучение способно возникнуть только в случае несферического ядра с меняющимся квадрупольным моментом ( $\sim MR^2$ ). Предсказать и оценить последний параметр — меру несферичности коллапса — практически невозможно. Примерно по той же причине не гарантировано гравитационное излучение вращающегося пульсара. Для меры его несферичности теория дает оценки в очень широком численном интервале ( $10^{-5}$ – $10^{-9}$ ). Что касается последнего источника — реликтового (космологического) гравитационно-волнового фона, — то его регистрация представляется наиболее

сложной проблемой, поскольку сводится к задаче детектирования одного шума (реликтовых гравитационных волн) на фоне другого шума (собственных флуктуаций антенны и локальных негравитационных помех окружения). Единственный рецепт успеха такого детектирования — использовать различия в корреляционных свойствах сигнала (гравитационного) шума, общего для двух разнесенных детекторов, и независимых локальных шумов их окружения. Выполнение алгоритма корреляционного детектирования сильно осложнено также малой интенсивностью самого гравитационно-волнового фона.

Таким образом, надежным остается только первый пункт из программ гравитационно-волнового поиска — излучение сливающихся двойных сверхплотных звезд. Как говорил И.С.Шкловский, звезды рождаются, живут и умирают [5]. Сверхплотная двойная, в силу потери энергии на гравитационное излучение, крайне медленным темпом сближается за  $10^8$ – $10^9$  лет до критического расстояния в несколько гравитационных радиусов, после чего уже стремительно (за доли секунды) сливается, образуя новый релятивистский объект, нестационарные колебания которого быстро затухают при переходе к равновесию. Иллюстрация процесса слияния с разбивкой по трем стадиям представлена на рис.7, известном как диаграмма К.Торна. Именно такого типа гравитационно-волновой сигнал и был зарегистрирован антеннами LIGO.

«Зарегистрирован» — значит «принят двумя антеннами», причем принято так, что критерий совпадения оказался выполненным. Поясним подробнее, что за этим стоит. Мы уже отмечали, что совпадение сигналов двух пространственно сильно разнесенных антенн служит практически единствен-

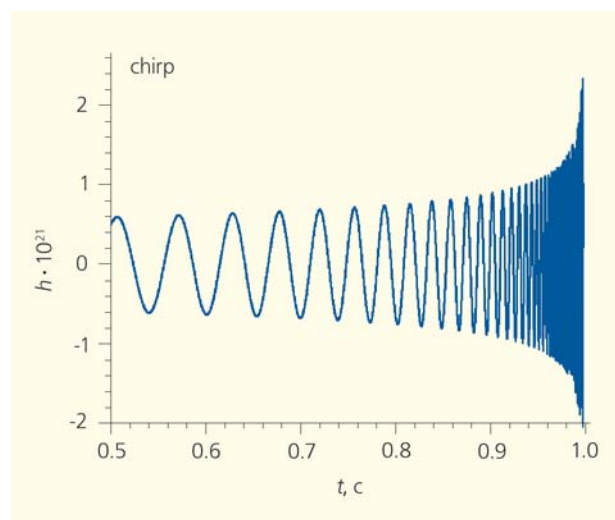
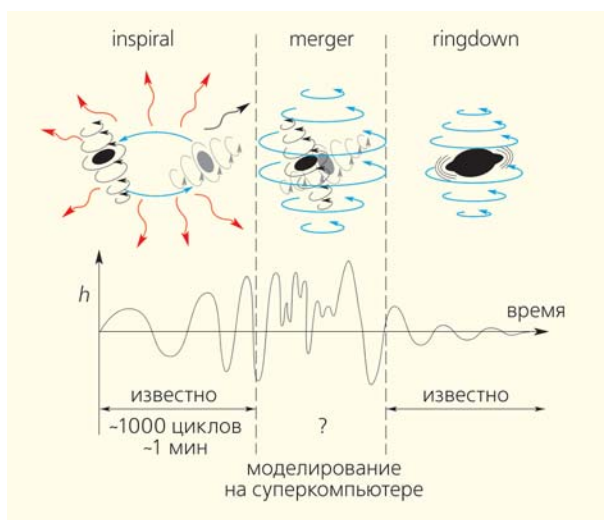


Рис.7. Рисунок К.Торна с изображением трех стадий слияния компонент релятивистской двойной звезды: скручивание орбиты (inspiral), слияние компонент (merger), затухание возбуждений, или «звон» (ringdown); справа — форма гравитационно-волнового сигнала с нарастающей частотой на первой стадии (максимальная амплитуда излучения на последних орбитах перед слиянием). Chirp — изменение частотной характеристики (звуковой аналог — «чирикание»).

ным доказательством того, что природа данных сигналов носит глобальный характер. Его источник должен находиться вне Земли — в космосе. Есть, конечно, вариант, что источник лежит где-то глубоко внутри нашей планеты — но тогда его воздействие должно регистрироваться геофизическими приборами — сейсмографами и гравиметрами.

Перейдем к критерию совпадений. На обеих антеннах сигнал должен значимо превзойти уровень шума, при этом примерно в одно и то же время. Слово «примерно» означает, что надо задать окно совпадений, т.е. величину допустимого временного сдвига (или точность совпадения), при котором оператор будет классифицировать сигнальные всплески как совпадающие. Конечно, это окно будет зависеть от характера шумового фона (шумовой статистики), маскирующего момент прихода сигнала случайным образом. Итак, сигналы на обеих антеннах должны превзойти шумовой уровень (порог) и сделать это одновременно, т.е. в окне совпадений. Данное правило называется критерием избыточной мощности. Но это еще не все. Надо убедиться, что совпадающие импульсы похожи по своей форме, ведь они порождены некоторым общим возбуждением. Чтобы оценить «похожесть», нужно из них образовать некоторую новую величину, так называемый коррелятор, для чего импульсы перемножаются и интегрируются (накапливаются) по времени на интервале их существования. Производная величина — коррелятор — также должна значимо превысить свой шумовой порог. Это правило называется критерием избыточной корреляции. Если оба критерия удовлетворяются, можно говорить о регистрации сигнала.

Кажется, сформулирован достаточно ясный алгоритм обнаружения. Более внимательный взгляд, однако, замечает еще одно усложняющее обстоятельство. Мы забыли указать центральную (несущую) частоту сигнала (форма, о которой мы упоминали выше, создается его огибающей). Действительно, лазерные интерферометрические антенны — широкополосные приемники, с частотным диапазоном от 10 Гц до 10 кГц. Нужно быть уверенным, что сигналы, которые мы испытывали на совпадения, принадлежат одинаковым частотным областям. Так возникает более изощренная методика, которая условно названа частотно-временным анализом. Полный частотный диапазон антенн разбивается на малые кусочки  $\Delta f$ . Сопряженные частотные зоны рассматриваются как самостоятельные гравитационные приемники, сигналы которых подвергаются временной обработке по критерию совпадений, описанному выше: выясняется, есть ли у них признаки совпадающих во времени возбуждений на интервалах  $(t_i, t_i + \Delta t)$ . Конечно, следить за таким массивом приемников в координатах  $(f, t)$ , отыскивая их совпадающие возбуждения в реальном масштабе времени, можно только с помощью компьютеров. Если обнаруживаются подозрительные зоны (ячейки) аномаль-

ных возбуждений, их начинают обрабатывать отдельно, восстанавливая форму сигнала с помощью специальных фильтрационных алгоритмов.

## Что увидели

Интерферометры LIGO — пара четырехкилометровых установок вблизи Сиэтла (Хэнфорд, северо-запад США) и Нового Орлеана (Ливингстон, юг США) с расстоянием 2300 км между ними — были созданы и запущены в режим наблюдений в 2006 г. (чему предшествовала огромная подготовительная работа). К 2010 г. было накоплено около двух лет непрерывных наблюдений, после чего началась модернизация установок. Гравитационно-волновых сигналов Вселенной обнаружено не было, но были указаны новые, экспериментальные, верхние границы на их возможную интенсивность. Интересно упомянуть одно из утверждений: «Короткие всплески гравитационно-волнового излучения (доли секунд) можно ожидать на установках LIGO не более одного-двух раз в год с достоверностью 90% на уровне спектральной плотности  $h \sim (6 \cdot 10^{-22} - 2 \cdot 10^{-21}) \text{ Гц}^{-1/2}$ ». Если кратко, секунднй всплеск амплитуды  $h \sim 10^{-21}$  был бы надежно зарегистрирован.

Модернизация интерферометров LIGO закончилась к лету 2015 г. (аналогичный процесс с VIRGO несколько задержался), и они были поставлены в режим испытаний с целью выхода на уровень новой, в 5 раз более высокой чувствительности к 2018 г. До модернизации радиус зоны охвата достижимых источников составлял ~20 Мпк, а после — увеличился в 10 раз, до 200 Мпк (это уже космологический масштаб, с которого Вселенная может рассматриваться как «однородно заполненная материей»).

Итак, пробная серия (запуск) установок LIGO стартовала в конце августа 2015 г., и 14 сентября был принят этот первый сигнал («вдруг и сенсационно», несмотря на все ожидания). Заслуживает уважения сдержанность и научный подход коллектива LIGO, который объявил об этом только спустя 4 месяца, 10 февраля, после скрупулезного анализа события во всех аспектах этого феномена, что выразилось в срочной публикации [1] и еще шести 20-страничных статей в arXiv.org>astro-ph. Иллюстрация зарегистрированного сигнала, представленная в «Physical Review Letters», воспроизведена на рис.8. Комментарий дан в подписи под рисунком. Главное в следующем: а) форма сигнала очень похожа на сигнал от «сливающейся двойной»; б) форма очень хорошо совпадает с теоретическим расчетом, в котором использованы параметры масс и частот, взятые из эксперимента; в) эти параметры показывают, что сигнал порожден двойной с компонентами в виде черных дыр; г) сопоставление энергии принятого сигнала с теоретической оценкой интенсивности гравита-



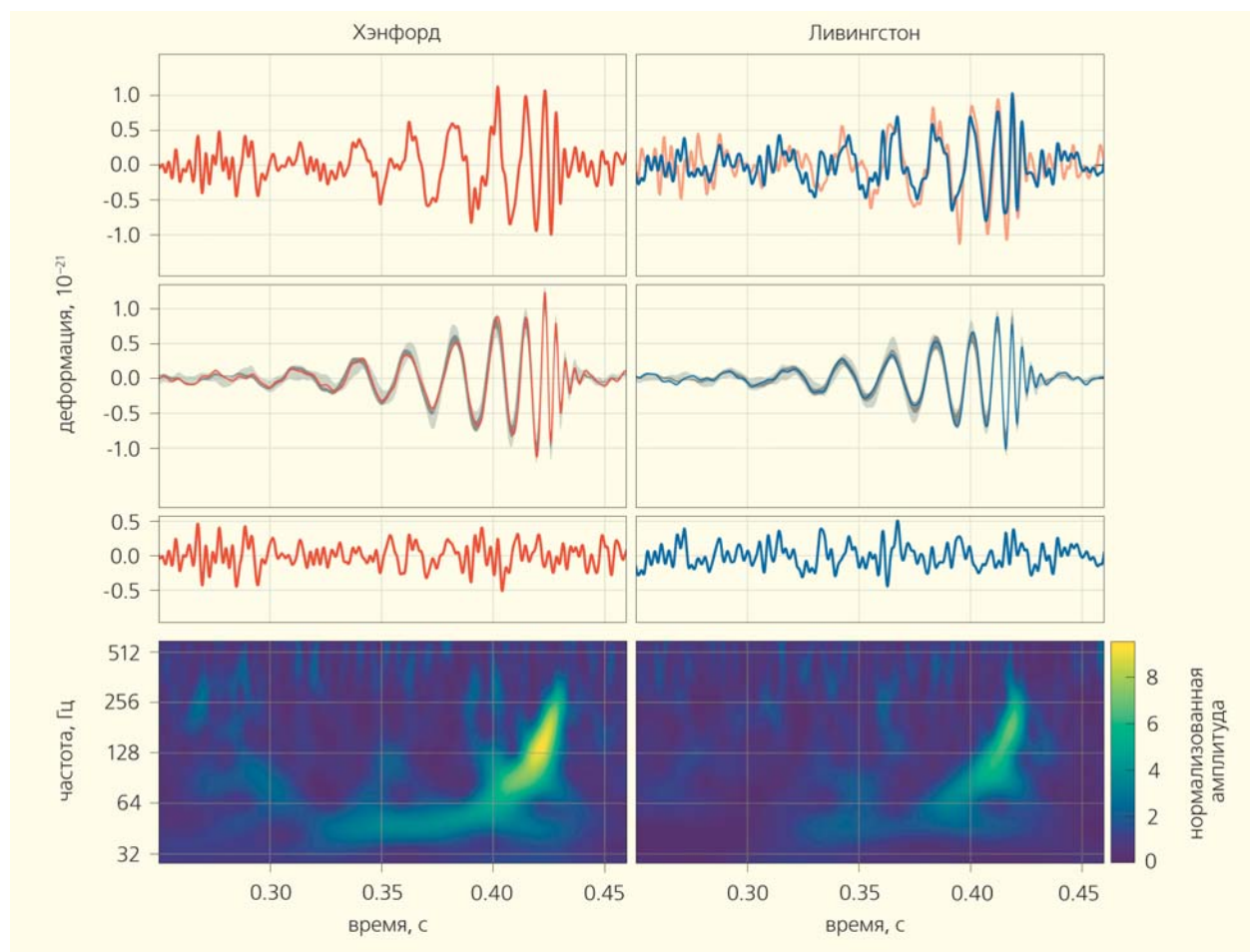


Рис.8. Регистрация первого гравитационного-волнового сигнала GW 150914 14 сентября 2015 г., 09:50:45 UTC [1]. Верхний ряд кадров: слева — запись детектора в Хэнфорде (красный трек), справа — запись детектора в Ливингстоне (синий трек), совмещенная со сдвигом на 6.5 мс с записью Хэнфорда (запаздывание сигнала). Второй ряд: теоретическая кривая сигнала для Хэнфорда (слева) и Ливингстона (справа). Третий ряд: остаточные шумы детекторов после вычитания теоретической кривой из экспериментальной. Внизу: частотно-временное представление данных, показывающее рост частоты сигнала.

ционно-волнового излучения от такого типа источников показывает, что объект (излучатель) находился на расстоянии  $\sim 400$  Мпк от Земли.

Как же это может быть, если антенны LIGO после модернизации должны были «дотягиваться» лишь до 200 Мпк? А дело в том, что все «надежные» оценки и расчеты были ориентированы на нейтронные звезды как реально существующие объекты Вселенной. Существование черных дыр, как известно, содержало в себе элемент гипотезы. Для черных дыр частота ожидаемых событий и, соответственно, их вероятность заметно возрастает (впервые это отметили ученые ГАИШ МГУ В.М.Липунов, К.А.Постнов и М.Е.Прохоров). Аргументация очень простая. «Чернодырная двойная» в силу большей массы произведет более интенсивное излучение, а значит, его можно будет принять на более далеком расстоянии. Расширение зоны охвата увеличивает число галактик, содержащих такие пары, весьма сильно — пропорцио-

нально кубу радиуса, и даже при очень малой вероятности события в одной галактике их интегральное число оказывается большим. Большим, чем можно ожидать для слияний нейтронных двойных. Таким образом, априори можно было сказать, что интерферометры скорее зарегистрируют сигнал от слияния черных дыр, чем от слияния нейтронных звезд. Так и оказалось.

Интересно добавить, что данный сигнал был бы обнаружен и «старой парой» детекторов LIGO, поскольку его амплитуда относительно большая,  $h \sim 10^{-21}$ , и была бы «по зубам» старым интерферометрам. А вот криогенные резонансные детекторы «Nautilus» и «Auriga» его все равно «пропустили» в силу их более высокого,  $\sim 1$  кГц, частотного диапазона. Ведь сигнал пришел на частоте  $\sim 100$  Гц (45–175 Гц) — черные дыры высоких частот не производят! Здесь наглядно проявилось преимущество интерферометрических детекторов на свободных массах как широкополосных антенн.

Ясно, что в дальнейшем надо «продвигать» будущие приемники в зону низких частот, хотя это и не очень просто.

## Что дальше?

Итак, произошло в высшей степени неординарное событие в науке. Зарегистрирован с большой достоверностью (вероятность «ложной тревоги» — случая — менее одной миллионной части) гравитационно-волновой всплеск, след космической катастрофы в глубинах Вселенной, на расстоянии  $\sim 10^9$  световых лет. При этом экспериментальные данные оказываются в замечательном согласии с предсказаниями и расчетами в рамках Общей теории относительности Эйнштейна (хочется «снять шляпу» перед человечеством — оно это предвидело, не пожалело усилий, и — так и оказалось!). Может, знаменательно и то, что это произошло спустя 100 лет после создания ОТО и предсказания гравитационных волн.

Если оценивать это событие по шкале фундаментальных открытий законов природы, то здесь таких два. Во-первых, получено первое прямое экспериментальное доказательство наличия гравитационного излучения (новой формы материи) и возможности его регистрации. Во-вторых, получено решительное доказательство существования черных дыр в природе как особой формы материи (предвидим, что научная общественность должна это оценить).

Означает ли все это, что стартует новая наука — гравитационно-волновая астрономия, которой будет доступна информация, запрятанная в самых удаленных и недоступных областях Вселенной, принимаемой как «конгломерат времени и пространства»? В принципе, да, но, вероятно, придется пройти еще очень длинную дорогу.

Оценки показывают, что было зарегистрировано весьма редкое событие (вероятность черных дыр с массами порядка  $30 M_{\odot}$  сама по себе мала, а сливающейся двойной — тем более). Чтобы гравитационно-волновая информация поступала регулярно, требуется еще увеличить чувствительность детекторов. Следует идти к уровню  $h \sim 10^{-24}$ , причем на частотах в единицы герц и ниже. А этому условию только подземные и космические

проекты могут удовлетворять. Человечество, однако, привыкло дерзать, невзирая на экономические и политические ограничения. Уже существуют международные проекты различной степени проработки, которые предусматривают развитие техники гравитационно-волнового эксперимента на пути создания подземных интерферометров с базой плеч в 10 и 20 км (Телескоп Эйнштейна), с криогенной техникой зеркал при мощности входной оптической накачки в 300 Вт («Voyager», «Cosmic Explorer»). Соответствующие планы сейчас формулируются со сроком до 2030 г. и финансированием, в несколько раз превышающем затраты на создание установок LIGO.

Какая научная программа может быть предъявлена в качестве аргументации разумности соответствующих затрат? Во многом ее формулировке будут способствовать результаты, которые будут получены в ближайшие пару лет на детекторах LIGO и VIRGO. Однако схематически обозначить контуры такой программы можно уже сейчас.

Для физиков будет интересным, можно ли с помощью гравитационно-волновых экспериментов ответить на такие вопросы, как: является ли ОТО адекватной (корректной) теорией гравитации; соответствует ли экспериментальная природа гравитационных волн их свойствам в ОТО; соответствуют ли детектируемые по гравитационным волнам черные дыры их описанию в ОТО; есть ли горизонт событий у наблюдаемых черных дыр и т.д. Астрофизики не откажутся прояснить, какова природа гравитационного коллапса, связаны ли с ним реальные источники гамма-всплесков, какова внутренняя структура черных дыр (компактных объектов) и др. Наконец, космологи постараются получить информацию о том, как формируются массивные черные дыры в центрах галактик, что есть темная энергия, каковы начальные физические условия Большого взрыва...

Даже из этого грубого перечисления ясно, какие нетривиальные возможности скрываются за фактом освоения нового гравитационно-волнового канала астрофизической информации. Отсюда и величие события, которому мы стали свидетелями, — открыт последний известный человечеству вид излучения, который еще вчера не был доступен. («Счастлив, кто посетил сей мир в его минуты роковые», — Ф.И.Тютчев.) ■

## Литература

1. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. Observation of gravitational waves from binary black hole merger // Phys. Rev. Lett. 2016. V.116. 061 102. Doi: 0031-9007/16/116(6)/061102(16).
2. Бичак И., Руденко В.Н. Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения. М., 1987.
3. Брагинский В.Б., Манукин А.Б., Попов Е.И. и др. Поиск гравитационного излучения внеземного происхождения // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т.16. Вып.3. С.157–161.
4. Герцештейн М.Е., Пустовойт В.И. О детектировании гравитационных волн малых частот // ЖЭТФ. 1962. Т.43. С.605–610.
5. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М., 1984.

# Литофагия: причины феномена

А.М.Паничев

Любая хозяйка знает: в желудках гусей, кур и уток всегда находятся камешки, которые птицы заглатывают, выискивая их на земле. Как показали исследования, желудки ископаемых форм растительноядных динозавров, древних прародителей птиц, тоже наполнены песком и камнями (гастролитами)\*. Песок и землистые (точнее, литогенные) вещества часто поглощают и млекопитающие, включая всех приматов, в том числе обезьян и человека. Каковы же причины такого необычного пищевого поведения?

Феномен заглатывания камней и землистых веществ в российской научной литературе обозначается термином «литофагия» (от греч. λίθος — камень и φάω — поедать), который появился в 1922 г. с легкой руки геолога и поэта П.Л.Драверта [1]. В англоязычной среде чаще используется другой, близкий по смыслу термин — георфагия (от греч. γη — земля).

Литофагия наиболее характерна для древних животных (включая ископаемые формы), имеющих мускульный желудок. В их числе птицы, рептилии, земноводные и некоторые рыбы. У таких животных, особенно растительноядных, в желудках

\* Подробнее см.: *Очев В.Г., Иванов А.В., Архангельский М.С.* Гастролиты ископаемых // *Природа*. 2004. №10. С.46–49. — *Примеч. ред.*



**Александр Михайлович Паничев**, кандидат геолого-минералогических наук и доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных Тихоокеанского института географии ДВО РАН, профессор Дальневосточного федерального университета (Владивосток). Основные научные интересы — литофагия, экология животных и человека, геохимическая экология, цеолиты и другие минералы в медицине.

**Ключевые слова:** литофагия, птицы, млекопитающие, редкие и редкоземельные элементы.

**Key words:** geophagia, birds, mammals, rare earth elements.

почти всегда присутствуют камешки — гастролиты. Среди млекопитающих животных типичные гастролиты характерны только для ластоногих. Наземным видам (в основном растительноядным и всеядным) литофагия также свойственна, но отмечается не повсеместно, а лишь в некоторых местообитаниях и только в определенные периоды годового цикла (чаще весной). В составе же поедаемых литогенных веществ преобладают не камешки, а землистые вещества чаще с илесто-глинистой размерностью частиц. Количество таких веществ, однократно съедаемых, как и масса гастролитов в желудках птиц, составляет 1–5% от массы тела конкретного животного. К примеру, в желудке трехкилограммовой курицы или гуся обычно находится около 30 г гастролитов, стокилограммовый олень за один раз может съесть от 1 до 5 кг глины, а слон с массой тела 5 т способен есть глину ведрами.

Особо следует отметить широкую распространенность литофагии среди приматов. Поедание землистых веществ отмечено практически у всех видов обезьян. Характерна литофагия и для людей. Описание этого явления можно найти у многих этнографов, изучавших быт и особенности питания аборигенного населения самых разных регионов мира. Литофагиальные традиции наиболее полно обобщены в двух монографиях: одна из них написана американским этнографом Б.Лауфером [2], другая — европейскими исследователями Б.Анеллом и С.Лагеркранцем [3].

Исследования литофагии ведутся по меньшей мере столетие. Научные публикации особенно активно множатся в последние полве-



Обнажение глинистых продуктов выветривания вулканических стекол дацитового состава с признаками поедания дикими копытными животными. Различия в окраске пород определяются степенью окисления железа. Сихотэ-Алинь, р. Кузнецова, сентябрь 2012 г.

Фото автора

ка, и их общее число уже перевалило далеко за тысячу. В настоящее время изучением литофагии занимаются более чем в сотне научных учреждений мира (в США, Канаде, Австралии и в странах Южной Америки, Африки, Европы и Азии). Большинство из них — университеты.

Уже более 40 лет этой темой занимается группа ученых, включающая геологов, биологов и медиков, под руководством автора этих строк. Большинство членов нашей команды — научные сотрудники двух институтов ДВО РАН — Тихоокеанского института географии и Дальневосточного геологического, а также Дальневосточного федерального университета. К настоящему времени по теме литофагии нами опубликовано около полусотни статей и три монографии.

Второй центр изучения литофагии в России действовал с середины 1980-х и до середины 1990-х годов в Новосибирске, в Сибирском научно-исследовательском институте геологии, геофизики и минерального сырья. Под руководством геолога В.И. Бгатова, крупного специалиста по геохимии кор выветривания, сотрудники этого института установили минеральный состав литогенных веществ, которые поедают животные, обитающие на территории Южной Сибири. Другое, не менее важное достижение сибирских ученых в исследовании феномена литофагии — проведение уникальных, пока никем не повторенных,

экспериментов, в которых было продемонстрировано участие разных видов кремнистых гастролитов в регуляции минерального и общего обмена веществ в организме птиц.

### Состав «съедобных» грунтов

Минеральный состав литогенных веществ, привлекающих животных с мускульным желудком, на удивление, однообразен и почти не зависит от геологических особенностей мест их обитания. Гастролиты птиц на 65–95% состоят из окатанных в разной степени кристаллов кварца или обломков окварцованных пород преимущественно песчаной размерности (у крупных страусов отдельные гастролиты могут достигать в поперечнике сантиметра и более). Второй по значимости минерал гастролитов — полевой шпат (точнее, разные его виды, относящиеся к высококремнистым каркасным алюмосиликатам). Такой состав гастролитов определяется преобладанием кварца и полевых шпатов в продуктах выветривания большинства горных пород на Земле.

Состав литогенных веществ, потребляемых растительноядными млекопитающими, напротив, может быть весьма разнообразен. Он зависит не только от геологии конкретного района, но и от зональности климата, определяющей характер выветривания горных пород и, соответственно, состав вторичных (гипергенных) минералов. Наиболее распространенные «съедобные» грунты млекопитающих состоят из глинистых минералов. Животные, обитающие в умеренных и высоких широтах, там, где распространены разные по возрасту метаморфические породы, едят в основном глинистые минералы из групп гидрослюды и хлоритов; в тропиках и субтропиках — из группы каолинита; в местах скопления молодых вулканических пород, независимо от географической зоны, — из группы смектита. В поедаемых смектитовых глинах нередко присутствуют цеолиты, преимущественно клиноптилолит и гейландит. Доля цеолитов иногда достигает 50% и более. Помимо глин и цеолитов такие «съедобные» литогенные вещества могут содержать примесь опаловидного кремнезема, а также кристаллов кварца и полевых шпатов. Мельчайшие частицы кварца — наиболее весомые добавки в гидрослюдистых и каолинистых «съедобных» глинах во всем мире. В некоторых из них присутствует примесь карбонатов кальция, достигающая иногда до 75% и более.

Количество водорастворимых солей в поедаемых породах, как правило, ничтожно. Состав поглощенных катионов обычно вполне типичен для окружающих рыхлых отложений, иногда с преобладанием ионов натрия. Максимум обменных катионов содержат цеолитовые разновидности «съедобных» земель, минимум — гидрослюдистые. Состав микроэлементов может быть очень раз-



Одно из многочисленных обнажений с признаками поедания копытными животными в береговой зоне Телецкого озера. Кварц-гидрослюдисто-хлоритовые тонкодисперсные аллювиальные отложения плейстоценового возраста. Горный Алтай, сентябрь 2015 г.

Фото И.В.Середкина

ным. Как правило, он наследуется от первичных (литифицированных) пород, но иногда некоторые макро- и микроэлементы привносятся за счет притока подземных вод.

Сухие обнажения «съедобных» грунтов чаще всего формируются по разломным зонам на седловинах гор, в бортах ручьев и рек. Подавляющее большинство цеолитсодержащих разновидностей — это вулканогенно-осадочные образования, возникшие, как правило, внутри вулканических кальдер. На территории Сихотэ-Алиня, где мы начали исследования еще в начале 1980-х годов\*, возраст кальдерных цеолитоносных отложений, которыми интересуются животные, колеблется в интервале палеоцена—эоцена.

Некоторые грунты, поедаемые млекопитающими, локали-



Молодой марал (*Cervus elaphus*), пришедший полакомиться глиной на обнажение в береговой зоне Телецкого озера. Снимок сделан 30 августа 2015 г. автоматической фотокамерой, установленной сотрудниками Алтайского государственного биосферного заповедника.

\* Подробнее см.: Паничев А.М. Литофация и геология // Природа. 1985. №9. С.34–39. — Примеч. ред.



Дикие зубры (*Bos gaurus*), поедающие глинистые грунты в районе водного источника на территории национального парка Кабини в Индии.

Фото Р.Ганди

зованы вблизи водных источников с минерализацией до 1 г/л. По химическому составу такие воды обычно гидрокарбонатно-натриевые, но иногда содержание натрия в них ничтожно, не превышает фоновых значений. Как нам удалось выявить на территории Сихотэ-Алиня, очень часто вода в источниках, вокруг которых животные оставили следы поедания грунта, обогащена редкоземельными элементами.

Более подробная информация о минеральном и химическом составе «съедобных» грунтов во всем мире, накопленная в результате многолетних исследований, изложена в двух наших монографиях [4, 5].

## Гипотезы

Существует немало предположений, объясняющих причины литофагии, но среди них пока не было ни одного, которое можно было бы применить одновременно ко всем группам животных, в том числе к человеку. В отношении растительоядных млекопитающих одно время была популярна «натриевая» гипотеза. Суть ее в том, что животные, испытывающие недостаток натрия, поступающего в организм с кормом и питьевой водой, вынуждены отыскивать в среде обитания и поглощать не только обогащенные дефицитным элементом растения (чаще водные виды), но и минерализованные воды (источников или моря), а также горные породы и почвогрунты. Однако после детального изучения выяснилось, что в большинстве случаев (их больше 50% среди млекопитающих и 100% у птиц) дефицит натрия не может быть восполнен за счет литогенных веществ, так как в них количества биологически до-

ступных форм этого элемента слишком ничтожны. Безуспешны пока и попытки подобным образом объяснить литофагию у животных — стремлением восполнить в организме недостаток каких-либо других макроэлементов, например кальция или железа.

По другой версии, литофагия и у млекопитающих, и у птиц может быть вызвана желанием нормализовать кислотность в пищеварительном тракте. Такое антацидное действие минеральных веществ может быть обусловлено сорбционным действием поглощаемых минеральных веществ по отношению, например, к фосфору в составе слабокислого электролита в пищеварительном тракте. Замечу, что любые минеральные сор-

бенты всегда выводят из организма существенные количества фосфора. Мы в этом убедились еще в конце 1980-х годов, когда занимались изучением ионообменных процессов, которые протекают в литогенных веществах в условиях пищеварительного тракта [4].

Упомянув птиц при обсуждении «антацидной» гипотезы, рассмотрим другое давно и прочно укоренившееся даже среди биологов объяснение причин литофагии у этой группы животных. Стремление птиц заглатывать мелкие камни и песок большинство ученых пока обосновывают мельничной функцией желудочных камней. С помощью мускульного желудка и заглатываемых твердых жерновов птицы якобы размалывают грубые растительные плоды (зерна, почки), упрощая тем самым их переваривание. Эта гипотеза — яркий пример заблуждения, поддерживаемого лишь умозрительной логикой, которая бесследно разрушается, когда дело доходит до экспериментов и внимательного анализа фактов. Согласно логике «мельничной» гипотезы, количество гастролитов должно быть максимальным именно тогда, когда в пищевой диете максимум твердых кормов (зерна, веточного корма или молодых почек). Что же мы наблюдаем в реальности? Во-первых, максимум гастролитов в желудках большинства зерноядных птиц не совпадает по времени с максимумом зерновых в их диете — в лучшем случае предваряет. А непосредственно в период массового питания зерновыми численность гастролитов у птиц начинает снижаться, что вытекает, к примеру, из данных наблюдений чилийских исследователей [6]. В желудках птиц из группы боровой дичи, которые питаются в основном ягодами, листвой и почками, максимум гастролитов обычно приходится на осень, минимум — на зиму и ран-

ною весну, вплоть до мая [7]. Между тем, если следовать логике сторонников «мельничной» гипотезы, именно зимой и ранней весной рябчики, тетерева и глухари более всего должны нуждаться в гастролитах. У водоплавающих видов птиц, по нашим наблюдениям, наибольшее количество гастролитов приходится на ранневесенний период. В это время в составе кормов, к примеру, у гусей, нередко преобладает молодая зелень, которую размалывать жерновами явно нет необходимости. Не подтверждают в должной мере справедливость «мельничной» гипотезы и специально проводившиеся американскими исследователями эксперименты, показавшие, что наличие камешков в мускульном желудке, особенно хорошо окатанных, оказывает малозначимое механическое воздействие на корм [8].

Имеется и другая группа фактов, явно расходящаяся с «мель-



Самка изюбря (*Cervus elaphus xanthopygus*), пришедшая к минерализованному источнику полакомиться глиной. Вершина ключа Каплановский, территория Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника, июнь 2015 г.

Фото автора



Олени изюбри, пьющие минерализованную воду из источника и поедающие глинистые грунты. Бассейн р.Колумбэ, средняя часть ключа Каплановский, территория Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника, июнь 2008 г.

Фото С.А.Пизюка



Разъединенное изюбрями обнажение сильно выветренных, оглиненных в районе водного источника, цеолитизированных туфов риолитов палеоценового возраста. Здесь и далее фото автора



Разъединенное дикими копытными животными обнажение цеолитизированных вулканогенно-осадочных пород палеоценового возраста. Наиболее активно выедаются глинистые породы с высоким содержанием редкоземельных и редких элементов под пластом бурого угля мощностью около 1 м. Река Милоградовка, ключ Угольный, сентябрь 2005 г.

ничной» гипотезой. Так, давно замечено, что в некоторых местообитаниях, там, где нет доступных россыпей мелких галек или песка, птицы могут поглощать в больших количествах минеральные частицы илесто-глинистой фракции. Такое поведение отмечено, например, у попугаев, обитающих в долине Амазонки [9], а также у диких голубей в некоторых районах Африки [10].

Подобные факты некоторые зарубежные исследователи объясняют стремлением птиц к детоксикации организма за счет сорбционно-нейтрализующего действия поглощаемых минералов в отношении некоторых токсичных компонентов растительных кормов — таких, например, как танины и гликозиды [11]. Если следовать этой логике, придется предположить, что в процессе эволюции птиц в некоторых местообитаниях мельничная функция гастролитов оказалась невостребованной и трансформировалась в более актуальную — детоксикационную. Чтобы не объяснять подобные, весьма сомнительные, чудеса эволюции, стоит признать, что главная функция гастролитов никак не связана ни с мельничным, ни с антиоксидантным их действием.

Еще в 1987 г. Бгатов с коллегами на основе тщательно выполненного экспериментального исследования показал, что функция гастролитов состоит прежде всего в регуляции химического состава электролитов пищеварительного тракта. Осуществляется она преимущественно за счет избирательной сорбции элементов на кремнеоксидном геле. Гель нарабатывается в слабощелочной среде кишечника из микрокрошки кремниевых минералов, поступающей из мускульного желудка, где она формируется в результате трения минеральных зерен друг о друга [12]. При обследовании птиц мы неоднократно отмечали, что в их наполненных гастролитами же-

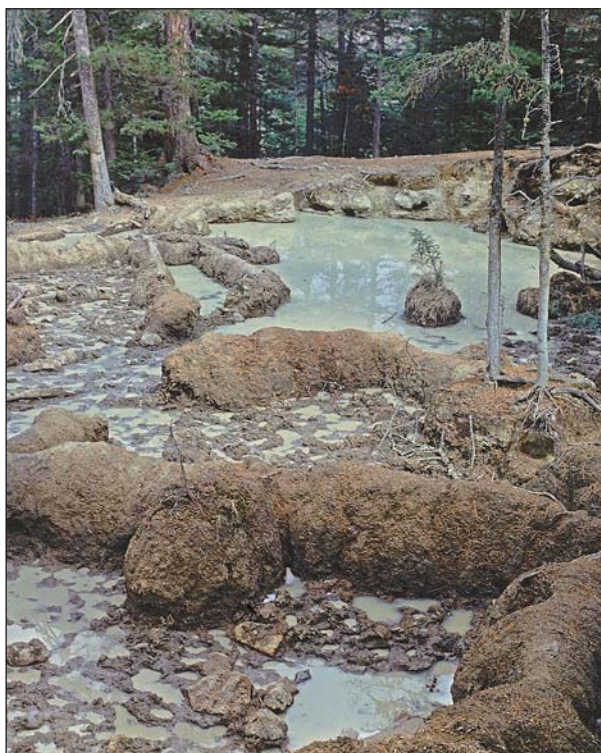


лудках либо вообще не было пищи, либо ее количество было очень незначительным. Именно в таких ситуациях мускульный желудок наиболее эффективно дробит минералы. Микрокрошка кварца и полевого шпата, попадая в щелочную среду кишечника, преобразуется в кремнеоксидный гель. Его частицы, имея отрицательный электрический заряд, в кишечнике обрастают, словно шубой, различными положительно заряженными ионами и выбрасываются из организма в составе помета. При отсутствии в среде обитания кремнистых минералов мелкогалечниковой или крупнопесчаной фракции (что наблюдается в поймах крупных долинных рек, таких, например, как Обь или Амазонка) птицы могут поглощать песчано-илистые и даже глинистые фракции кремнистых минералов.

Предпочтение птицами именно крупных фракций минералов, возможно, объясняется тем, что наработка такого геля из крошек в результате механохимических реакций в мускульном желудке происходит наиболее эффективно. Похоже, амазонские попугаи просто вынуждены потреблять кремнистые породы в единственно доступной им тонкозернистой фракции. Птицы нередко прилетают издалека, чтобы посетить подходящие обнажения рыхлых мелкозернистых горных пород. Аналогичные организованные кочевки на дальние расстояния с целью поиска подходящих гастролитов наблюдаются и у глухарей, обитающих в некоторых районах Западной Сибири [13].

Изучая литературу по гастролитам, мы обнаружили свидетельства того, что их встречаемость по сезонам года может существенно различаться не только у разных видов птиц, но и у представителей одного вида в зависимости от местообитания и конкретных параметров состояния среды. Установлено, к примеру, что в Южной Америке максимальным потреблением грунтов отличаются попугаи, живущие на территориях, где выпадает максимум дождей и где распространены молодые вулканические горные породы [9].

Таким образом, количество гастролитов в желудках птиц зависит от многих факторов среды, причем как временных, так и постоянно действующих. К последним, несомненно, относится геологическое строение основания ландшафта и зависимый от этого химический состав почв конкретного региона. Временно действующие факторы — это годовые особенности появления и схода снега, глубина снежного покрова, характер и интенсивность дождей в летний период. (Наличие снега отражается на возможности сбора гастролитов; дожди влияют на химический состав растительности, поскольку вода легко вымывает из почв существенную часть биофильных элементов.) Очевидно, непрерывно действующие факторы (прежде всего геологические) определяют общий характер литофагии среди птиц, постоянно



Разъединенное дикими копытными животными обнажение оглиненных цеолитизированных вулканогенно-осадочных пород палеоценового возраста в верховьях р.Левая Колумбэ, май 1987 г.

обитающих на той или иной территории, а временно действующие могут менять лишь степень выраженности литофагии от сезона к сезону.

Какие элементы птицы вынуждены искать, а какие — выводить из организма? Не исключено, что к числу последних принадлежит все тот же фосфор, избыток которого в пищеварительном тракте может осложнять сдвиг кислотно-щелочного равновесия в необходимую щелочную область. Однако у нас уже появились основания считать, что в числе избыточных (впрочем, как и в числе дефицитных) могут быть и другие элементы. Какие это элементы, обсудим чуть позже, а пока подведем промежуточный итог.

Итак, проглатываемые минеральные вещества всегда в той или иной мере обладают сорбционными свойствами по отношению к различным ионам, преимущественно положительно заряженным. Сорбционными эффектами «съедобных» минералов можно объяснить стремление животных прекратить диарейные явления, которые, как известно, могут быть вызваны размножением патогенной микрофлоры или избытком в желудочно-кишечном тракте ионов калия. Последний случай наиболее актуален для травоядных млекопитающих в весеннее время.

И все же анализ всего набора собранных нами фактов по литофагии указывает на то, что «сорб-

ционная» и «натриевая» гипотезы не могут претендовать на роль универсальной объясняющей причины этого явления у всех групп животных.

### Поиск универсальной причины

За многие годы исследований феномена литофагии пока так и не удалось выявить его связь с эндемическими проявлениями — геохимически обусловленными заболеваниями, вызванными избытком или недостатком в среде обитания конкретной группы животных какого-либо макро- или микроэлемента (или их сочетания). Натрий в данном случае не в счет, поскольку встречается далеко не во всех литогенных веществах, да и серьезных патологий в связи с его дефицитом у животных, в том числе у людей, не выявлено.

При осмыслении причины литофагии в ключе геохимических эндемий важными представляются результаты экспериментальной работы, выполненной американскими исследователями под руководством С.Р.Барчфилда [14]. По их данным, стремление к литофагии у крыс возникает только

в том случае, если животные находятся в состоянии стресса — особой неспецифической реакции организма на раздражители внешней среды. Стресс, по сути, — проявление дезадаптации, т.е. состояния, когда иммунная система под воздействием внешних факторов не может обеспечить протекание всего спектра биохимических и нервно-психических процессов, адекватно компенсирующих негативное воздействие на организм геохимических, климатических или иных раздражителей. Как известно, длительный стресс может спровоцировать различные патологические процессы в организме.

Из этих рассуждений следует, что если и искать биогеохимическую причину литофагии, то это необходимо делать в контексте биохимической специфики иммунной системы, определяемой участием в ее работе каких-то химических элементов, обладающих некими важными биологическими функциями.

После очередной серии аналитических исследований минеральных веществ, потребляемых дикими копытными животными в разных районах России, мы предположили, что главной в феноме-



Дикие животные, которые поедают грунты и пьют воду на вытоптанной посреди тропического леса поляне в районе выходов минерализованных источников. Территория национального парка в приграничной части Камеруна и Заира, Африка.

<http://volkov-serge.livejournal.com/127367.html>

не литофагии (независимо от вида животных) вполне может быть геохимически обусловленная причина, связанная с набором микроэлементов из состава редких и редкоземельных.

Впервые о редкоземельных элементах (РЗЭ) применительно к литофагии мы задумались, когда начали изучать места, посещаемые дикими копытными животными для поедания горных пород в верховьях р.Милоградовки в Сихотэ-Алине. Мы обратили внимание на то, что в «съедобных» породах (цеолитизованные пепловые туфы риолитов) повышена концентрация РЗЭ. Недавно факт избирательного поиска животными таких пород мы установили на территории Сихотэ-Алинского биосферного заповедника. И не только. В результате анализа данных зарубежных авторов аналогичные закономерности обнаружены во многих районах Африки и Юго-Восточной Азии, включая случаи поедания животными минеральных веществ термитников [15]. Эти факты хорошо согласуются с давно замеченным разными исследователями накоплением элементов группы РЗЭ в некоторых магматических горных породах, прежде всего в кислых эффузивах, некоторых базальтоидах и карбонатитах, а также в зоне выветривания самых различных горных пород, особенно в глинистых корах выветривания.

Обнаружив в наиболее предпочитаемых животными породах и минерализованных водах повышенное содержание РЗЭ, мы обратились к литературным источникам, в которых оценивались медико-биологические свойства этой группы элементов [16]. Оказалось, что все лантаноиды обладают высокой биологической активностью. Из того, что удалось собрать, отметим главное. Лантан и церий способны замещать кальций (возможно, и магний) в составе белков, в том числе во многих ферментах, существенно меняя их функции. Установлено также, что РЗЭ влияют на работу таких важнейших желез внутренней секреции, как щитовидная и эпифиз, что сказывается на скорости роста организмов. Эти данные многократно подтверждены не только в экспериментах, но и в условиях производства. Стимуляторы роста на основе РЗЭ уже давно и успешно используются животноводами в Китае и Европе. Достоверно установлено также, что РЗЭ участвуют в биохимических процессах, связанных с обменом Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Ni и Co в нервных тканях, затрагивают и генетический уровень организации живых систем. Наконец, некоторые исследователи связывают эндемические заболевания (в частности, сердца и крови) жителей Индии и Африки с неравномерным распределением РЗЭ в воде, почвах и подстилающих горных породах. Об этих заболеваниях известно сравнительно давно, но определяющее значение геохимического фактора в их развитии обнаружено недавно; в настоящее время это направление медицины активно развивается.

Таким образом, мы подошли к обоснованию гипотезы, претендующей на роль универсальной. Суть ее в том, что животные (как и человек в архаичных условиях жизни) постоянно подвергаются жесткому воздействию различных факторов окружающей среды. Сопrotивляемость организма такому воздействию в значительной мере зависит от устойчивости иммунной системы. Судя по анализу всего спектра имеющихся у нас данных, в число особо важных химических элементов, обеспечивающих бесперебойную работу иммунной системы (назовем их условно элементами иммунной системы, или ЭИС), входят In, Sc, La и легкие лантаноиды — Ce, Pr, Nd, Pm, Sm. Проблема с обменом ЭИС в организме, похоже, часто связана с химическим антагонизмом между легкими и тяжелыми лантаноидами, способными замещать друг друга в биологических тканях, но при этом тяжелые аналоги не могут выполнять необходимые организму функции. Таким образом, у животных и людей может периодически возникать потребность в восполнении дефицитных элементов, включая легкие лантаноиды, или в выведении периодически накапливающихся тяжелых лантаноидов, которые способны маскировать легкие аналоги. У древних животных с мускульным желудком, у которых, как известно, система выведения менее совершенна, эта проблема решается постоянно, за счет присутствия кремниевых минералов (всегда содержащих ЭИС), а также за счет выведения с помощью кремнеоксидных гелей химических веществ, негативно влияющих на работу ЭИС. У млекопитающих такая проблема решается периодически, на уровне инстинктивного потребления литогенных веществ и воды, обогащенной ЭИС.

Давно выявленное стремление некоторых животных к поиску дополнительных источников натрия, в том числе в виде землистых веществ, в ряде случаев также может быть связано с состоянием стресса. При этом дополнительная порция натрия способствует улучшению состояния организма, но в полной мере не решает проблему сбоя в работе иммунной системы. Кроме того, натрий часто становится спутником редких и редкоземельных элементов, активно мигрирующих в щелочной среде.

Связь литофагии с ЭИС пока наиболее показательна для Африки. Все наиболее массовые случаи литофагии территориально приурочены к зоне влияния Восточно-Африканского рифта, где широко распространены различные (от основных до ультракислых) щелочные породы с высоким содержанием РЗЭ и редких элементов. В жарком и влажном климате возникают благоприятные условия для контрастного перераспределения этих элементов в грунтовых водах, почвах и коре выветривания горных пород. Этот контраст, несомненно, проявляется в химическом составе растительности, в итоге это вполне может вызывать специфические эндемические проблемы у травоядных животных.

ядных животных, а также у людей, ведущих архаичный, преимущественно растительный, образ жизни. В ряду уже подмеченных патологий у человека на данной территории, имеющих наиболее вероятную связь с геохимическими факторами, — серповидно-клеточная анемия, а также эндокардиальный фиброз, ранее описываемые под общим названием *sachexia africana*.

Важно отличать инстинктивную традиционную литофагию (в одних и тех же местах в течение многих лет) от случаев инстинктивного попутного (в любом подходящем месте) поглощения глинистых грунтов, что характерно для многих животных, в том числе и для некоторых хищников (например, медведей). Эту форму литофагии, по всей видимости, можно объяснить древним инстинктом самолечения при возникновении самых разных текущих проблем со здоровьем (при диарее, отравлениях, ранениях, заражении паразитами и т.д.) с помощью различных алюмосиликатов коры выветривания горных пород. К сожалению, не всегда поглощение грунтов полезно для организма. Иногда такое самолечение

наносит и вред — происходит заражение гельминтами или возникают такие проблемы, как гипокалиемия или анемия за счет избирательного выноса из организма калия и железа соответственно, что многократно описано в специальной литературе.

Самый сложный вопрос в предлагаемой гипотезе — как животные находят необходимые минеральные вещества? Пока можно лишь предположить, что животные способны чувствовать не только ионы натрия, но и некоторые другие элементы или какие-то их сочетания в виде устойчивых минеральных ассоциаций, причем такая чувствительность животных может быть как-то связана с уже установленным влиянием данной группы элементов на работу сердечной мышцы и мозга.

В заключение замечу, что окончательное выяснение причин феномена литофагии — это путь не только к познанию принципиально важных основ экологии животных, но и к поиску новых лекарственных средств для медицины. Именно поэтому данное направление исследований заслуживает пристального внимания ученых. ■

## Литература

1. Драверт П.Л. О литофагии // Сибирская природа. 1922. №1. С.3–6.
2. Laufer B. Geophagy // Field Mus. Natur. Hist. Publ. Anthropol. Ser. 1930. V.18. №280. P.99–198.
3. Anell B., Lagercrantz S. Geofagial Customs: Studia Ethnographica Upsaliensia, XVII. Uppsala, 1958.
4. Паничев А.М. Литофагия в мире животных и человека. М., 1990.
5. Паничев А.М. Литофагия: геологические, экологические и биомедицинские аспекты. М., 2011.
6. Lopez-Calleja M.V., Soto-Gamboa A., Rezende E.L. The role of gastrolites on feeding behavior and digestive efficiency in the rufous-collared sparrow // Condor. 2000. V.102. P.465–469.
7. Савченко И.А., Савченко А.П., Кузилова Н.А. Значение гастролитов в жизни тетеревиных птиц Центральной Сибири // Вестник КрасГАУ. 2009. №11. С.112–117.
8. Moore S.J. Use of an artificial gizzard to investigate the effect of grit on the breakdown of grass // J. Zool., Lond. 1998. V.246. P.119–124. Doi:10.1111/j.1469-7998.1998.tb00140.x.
9. Lee A.T.K., Kumar S., Brightsmith D.J., Marsden S.J. Parrot claylick distribution in South America: do patterns of «where» help answer the question «why»? // Ecography. 2010. V.33. P.503–513. Doi:10.1111/j.1600-0587.2009.05878.x.
10. Downs C.T. Geophagy in the African Olive Pigeon *Columba arquatrix* // Ostrich. 2006. V.77. P.40–44.
11. Gilardi J.D., Duffey S.S., Munn C.A., Tell L. Biochemical functions of geophagy in parrots: detoxification of dietary toxins and cytoprotective effects // J. Chem. Ecol. 1999. №25. P.897–922.
12. Бгатов В.И., Мотовилов К.Я., Спешилова М.А. Функции природных минералов в обменных процессах сельскохозяйственной птицы // С.-х. биология. 1987. №7. С.98–102.
13. Назаров А.А., Шубникова О.Н., Кириков С.В. Северная тайга // Тетеревиные птицы. М., 1975. С.31–40.
14. Burchfield S.R., Elich M.S., Woods S.C. Geophagia in response to stress and arthritis // Physiol. Behav. 1977. V.19. P.265–267. Doi:10.1016/0031-9384(77)90337-7.
15. Panichev A.M., Popov V.K., Chekryzhov I.Yu. et al. Rare earth elements upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions // Environ. Geochem. Health. 2015. Doi:10.1007/s10653-015-9788-7.
16. Panichev A.M. Rare earth elements: Review of medical and biological properties and their abundance in the rock materials and mineralized spring waters in the context of animal and human geophagia reasons evaluation // Achievements in the Life Sciences. 2015. Doi:10.1016/j.als.2015.12.001.

# Юрские динозавры Забайкалья

В.Р.Алифанов, С.В.Савельев

Несколько лет назад в журнале «Природа»\* и других изданиях сообщалось об открытии местонахождения юрских динозавров Кулинда в Забайкалье и о новых полевых сборах, которые провела летом 2011 г. совместная экспедиция Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК, Чита) и Палеонтологического института им.А.А.Борисяка РАН (Москва). Участники планировали продолжить совместные полевые и камеральные исследования, но реализовать эти планы по ряду причин не удалось. Однако изучение первоначально собранной коллекции не прекращалось. В настоящий момент завершён период определительской работы, на финише находится описательный этап. Вместе с новыми данными на повестку дня выходят вопросы теоретических обобщений. Им главным образом и посвящена данная статья.



**Владимир Рудольфович Алифанов**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Палеонтологического института им.А.А.Борисяка РАН. Специалист в области морфологии, филогении и систематики ископаемых пресмыкающихся.



**Сергей Вячеславович Савельев**, доктор биологических наук, заведующий лабораторией развития нервной системы Института морфологии человека РАН. Область научных интересов — эмбриология и патоморфология нервной системы животных и человека, механика развития, зоопсихология и палеоневрология.

**Ключевые слова:** палеогерпетология, систематика, морфология.  
**Key words:** palaeoherpetology, systematics, morphology.

## Еще раз об истории открытия Кулинды

Напомним, что местонахождение позднеюрских динозавров Кулинда, открытое в 2010 г. читинским геологом С.М.Синицей (ИПРЭК), — первое и пока един-

ственное подобного рода в России. Оно прежде всего интересно тем, что проливает свет на состав форм, живших на территории Центральной Азии в самом конце юрского периода, примерно 145–150 млн лет назад. Материалы из Кулинды позволяют также описать детали строения кожных покровов некоторых групп динозавров, коснуться проблем, связанных с возникновением у них перьев и даже оценить в свете новых полученных данных ряд устоявшихся положений современной палеонтологии позвоночных.

А началось все летом 2010 г., во время проведения геологической экскурсии в пади Кулинда на территории Чернышевского р-на Забайкальского края. На случайно подобранном и расколоте куске породы из отвала прорытой когда-то геологами канавы, вскрывающей отложения распространенной здесь укурейской свиты пограничного юрско-мелового возраста, обнаружился отпечаток пары костей небольшого позвоночного. Образец вскоре был передан

\* Алифанов В.Р. Кулинда — первое в России местонахождение позднеюрских динозавров // Природа. 2012. №3. С.53–54.



Местонахождение динозавров Кулинда. В Забайкалье костеносные отложения укурейской свиты выходят на дневную поверхность на склоне пади Кулинда. Они сформировались на дне древнего озера, существовавшего в конце юрского периода, 145–150 млн лет назад.

Здесь и далее фото С.В.Савельева

в Палеонтологический институт, где подтвердилась принадлежность остатков динозавру. Это определение стимулировало специальную полевую поездку команды сборщиков из Читы на данное местонахождение в сентябре того же года. Она принесла первую немногочисленную коллекцию находок, сразу высланную в Москву. Эти материалы в полной мере показали перспективность планомерных раскопочных работ.

В июне 2011 г. два небольших экспедиционных отряда из Читы и Москвы встретились в Кулинде. Почти месячные раскопки прояснили специфику нового местонахождения, дополнили сборы и позволили определить перспективы на будущее. В конце полевого сезона собранная коллекция была разделена на две части. Большая из них осталась в отряде ИПРЭК для перевозки ее на хранение в Читу, а меньшая была отправлена в Москву для подробного исследования.

Образцы из Кулинды — это сравнительно небольшие куски породы с отпечатками изолированных элементов скелета как с сохранившейся фосфоризированной костной тканью, так и без нее. На них обычно представлены одна или несколько потерявших сочленение костей (фрагменты челюстей, позвонки, ребра и кости конечностей) небольших по размерам динозавров. Интересной деталью кулиндийских материалов оказалось редкое сочетание костных остатков с элементами покро-

вов в виде чешуй или щетинковидных образований и их пучков. Первоначальную задачу определения остатков на уровне систематических групп высокого ранга оказалось возможным решить по итогам исследования всех находок.

На основе самых предварительных данных участники общих раскопок сделали ряд публичных выступлений о значении нового местонахождения. Первое такое мероприятие носило совместный характер и прошло уже в 2011 г., в краеведческом музее г.Чернышевска, расположенного недалеко от местонахождения, перед представителями местной общественности и прессы. А вскоре появились публикации в некоторых отечественных научно-просветительских журналах\*.

### Параллельные программы

Еще летом 2011 г. возник план вскрытия широкой площади костеносных слоев в Кулинде в будущем полевом сезоне. Однако сбываться ему не удалось, поскольку несколько месяцев спустя события стали развиваться в ином направлении.

\* Алифанов В.Р., Савельев С.В. Юрские обитатели Забайкалья // National Geographic Россия. 2011. №11. С.70; Алифанов В.Р., Синица С.М. «Парк юрского периода» в Забайкалье // Наука в России. 2013. №1. С.16–20.

Понять их можно в свете нынешнего недостаточного финансирования отечественной науки и трудностей ее выживания в провинции. Палеонтологию в этих условиях особенно болезненно затронула коммерциализация всех сторон жизни. В результате остатки древних организмов, ранее представлявшие только профессиональный интерес для специалистов, попали в число объектов торговли, ориентированной главным образом на удовлетворение спроса иностранных коллекционеров. В последние годы акцент сместился на другую форму доступа к обнаруженным на территории нашей страны новым палеонтологическим местонахождениям и образцам. Внешне она носит вполне правомерный характер, поскольку строится на формальных соглашениях об исследовательской кооперации между российскими и зарубежными научными организациями. Однако при редкости (а иногда и полном отсутствии) среди участников подобных программ местных специалистов по палеонтологии позвоночных всю инициативу в проведении исследований и подведении их итогов берет на себя иностранная сторона. Относить получаемые в этих условиях результаты к достижениям отечественной науки можно лишь с большой долей условности. Основная выгода сотрудничества для местной стороны в этих случаях заключена, скорее, в ином. Это, главным образом, возможность получения от иностранного фонда недостающих средств для проведения полевых работ, приобретения оборудования и компенсации текущих расходов.

Именно такой вариант сотрудничества наши забайкальские коллеги в итоге и сочли более перспективным. Вероятней всего, решение о новом направлении своей деятельности они приняли уже осенью того же 2011 года. Именно тогда от них в администрацию Палеонтологического института стали поступать неожиданные претензии, с одной стороны, на то, что специалисты якобы затягивают предоставление результатов исследований, а с другой — на недостаточную подробность предварительных определений. Возник вопрос и о собственности оказавшегося в институте материала, большая часть которого на тот момент была добыта совместной экспедицией в 2011 г.

Следует заметить, что практика введения в научный оборот палеонтологических находок, обнаруживаемых полевыми геологами, устоялась еще в советское время. Обычно образцы передавали для исследования в одну из научных организаций, профессионально занимающуюся изучением и хранением коллекций ископаемых организмов. В России это в первую очередь Палеонтологический институт. Материалы обычно принимаются с условием либо включения их в коллекционные фонды, либо возвращения образцов в приславшую их организацию. Находки, поступающие на обработку без предварительной маркировки, получают

коллекционный номер и входят в состав общего фонда хранения. Существует также практика заключения между сторонами договора, предусматривающего возможность совместных поисков, раскопок, исследований и публикаций. Иногда подобные отношения складываются естественным образом и имеют длительную историю, как, кстати, было во взаимоотношениях между Палеонтологическим институтом и ИПРЭК. В результате взаимовыгодного сотрудничества отдельные находки в Забайкалье часто становились поводом для специальных экспедиций с участием сотрудников обеих организаций, а ученых из ИПРЭК не раз приглашали в совместные экспедиции в другие регионы, в том числе и за рубежом.

Причина внезапного поворота наших забайкальских коллег в сторону отказа от прежних контактов стала явной в 2012 г., когда в краевых средствах массовой информации замелькали сообщения, анонсирующие сотрудничество дальневосточных и зарубежных научных групп по изучению местонахождения Кулинды. Раскопки в рамках нового проекта состоялись в 2013 г., а собранный материал послужил основой для пока единственной крупной совместной публикации. Она вышла в 2014 г. в журнале *Science* [1].

Наша сторона, в свою очередь, опубликовала в отечественных научных журналах серию работ, посвященных самым разным аспектам изучения материалов из Кулинды [2–6]. Среди них есть и краткие сообщения, и полновесные статьи, включающие описание отдельных находок и форм, а также обсуждение широкого круга сопутствующих вопросов и проблем.

Таким образом, ход событий привел к появлению двух параллельных программ исследования кулиндийских динозавров, а их реализация — к двум независимо полученным группам результатов.

Наиболее примечательной оказалась разница в оценке разнообразия древней фауны. Согласно выводам упомянутой статьи в *Science*, в Кулинде обитал один-единственный мезозойский ящер, который получил название «кулиндадромей», или «кулиндадром» (*Kulindadromeus*). Он классифицирован в качестве представителя птицетазовых динозавров (*Ornithischia*) из группы неоорнитисхий, объединяющей пучок базальных (т.е. архаичных) линий, а также пахицефалозавров (*Pachycephalosauria*), птиценогих (*Ornithopoda*) и рогатых (*Ceratopsia*) динозавров.

Напротив, по нашим данным, ископаемые остатки кулиндийских динозавров принадлежат представителям таких крупных групп динозавров, как тероподы (*Theropoda*) и птицетазовые динозавры. Углубленное изучение образцов показало, что большинство окаменелостей относится к последней группе и принадлежат дауросавру (*Daurosaurus*). Материалы по еще одному птицетазовому динозавру — кулиндаптериксу

(*Kulindapteryx*) — встречаются реже. Обе формы относятся к разным, но близкородственным семействам орнитопод (Ornithopoda): гипсилофодонтидам (Hypsilophodontidae) и джехолозавридам (Jeholosauridae) соответственно [4]. Среди теропод удалось выявить неизвестную ранее форму — лепидохейрозавра (*Lepidocheirosaurus*), входящую в состав нового семейства Nqwebasauridae из группы орнитомимозавров (Ornithomimosauria) [6]. Со временем выяснилось, что в комплексе есть остатки представителя и еще одной группы — завропод, которые слывут гигантами даже среди динозавров.

Кроме таксономических определений заочные исследовательские разногласия возникли в отношении реконструкции внешнего вида новых динозавров, их родственных связей, интерпретации покровных структур и возраста находок. Различной оказалась и оценка значения местонахождения в ряду ему подобных.

### «Кулиндадром»

Описание «кулиндадрома» в Science сопровождалось реконструкцией внешности этого динозавра: его тело преимущественно покрыто перьями, кроме хвоста, который почти от основания несет крупные рептилийные роговые чешуи. За всеми этими деталями действительно стоят конкретные находки. Похоже выглядят и наши реконструкции даурозавра и кулиндаптерикса, но у последних на хвосте изображены не чешуи, а удлинённые покровные придатки, как и на других частях тела.

Чтобы оценить, чье представление более достоверно, надо прежде всего учитывать отсутствие в Кулинде полных скелетов. Подчеркнем: реконструкция «кулиндадрома» основана на допущении о принадлежности всех остатков в захоронении исключительно одному виду динозавров. Такой подход контрастирует с нашими более широкими определениями, о чем уже говорилось. Тут мы сталкиваемся с обычной для практики палеонтологии проблемой: оценкой таксономического разнообразия собранного материала, часто фрагментарного и представленного ограниченным числом находок. В этом случае вопрос, можно ли считать наблюдаемые различия однотипных материалов выражением изменчивости (или полиморфизма) внутри одного или нескольких видов, представляет собой предмет постоянных сомнений, а недостаток надежных критериев порождает разные оценочные подходы. Одни исследователи склонны минимизировать значение подобных различий, а другие, наоборот, видят в них основу для выделения самостоятельных форм. Наиболее крайние сторонники этих двух направлений характеризуются как «объединители» и «дробители» соответственно. Схожая проблема возникает и в отношении орнитоподных динозавров из Кулинды. Однако ес-

ли наше заключение о существовании двух видов из близких семейств — гипсилофодонтид и джехолозаврид — верно, то правомерность описания «кулиндадрома» требует переисследования, поскольку типовая коллекция этой формы с высокой степенью вероятности может содержать остатки нескольких таксонов. Еще одна и уже бесспорная причина для такой ревизии состоит в том, что состав фауны динозавров Кулинды заведомо не может ограничиваться представителями только растительноядных птицетазовых динозавров.

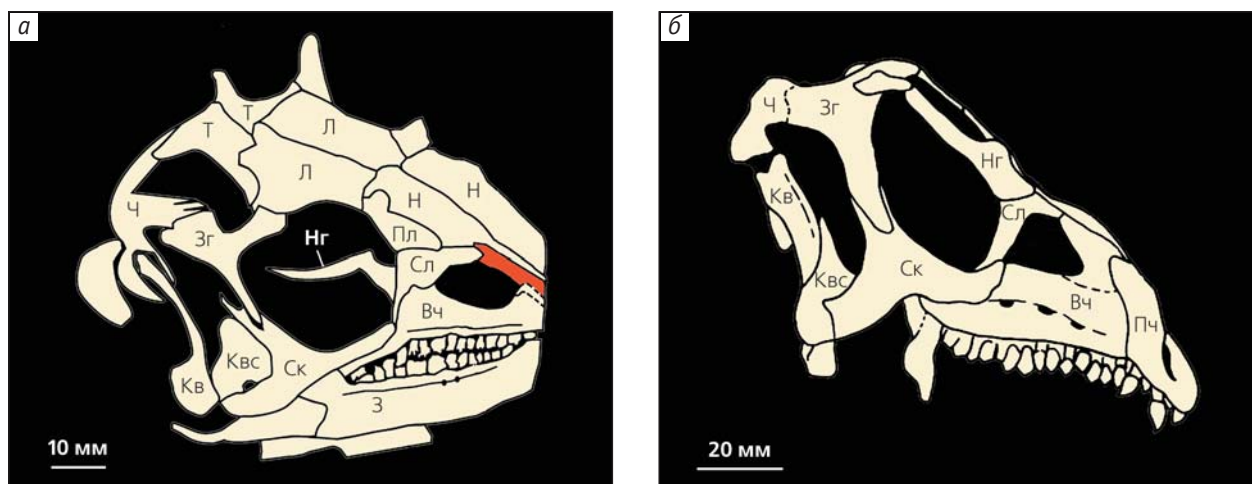
Говоря об орнитоподах из Кулинды, отметим еще одну трудность, касающуюся области биологической номенклатуры. Скорее всего, «кулиндадром» и описанный нами даурозавр — это одна и та же форма, т.е. предложенные названия — синонимы. В подобном случае встает практически значимый вопрос: какое из них имеет право на употребление? Проблема заключается в том, что в качестве типового образца (голотипа) для «кулиндадрома» был выбран череп, а для даурозавра — часть посткраниального скелета, включающая кости таза и задней конечности. Прямо сопоставить эти два объекта невозможно до появления полных находок, надеяться на которые в ближайшем будущем вряд ли стоит.

В свете обозначенных проблем интересно обратить внимание на детали описания «кулиндадрома». Для него, как уже было сказано, в качестве голотипа использован череп, видимо, лучший из серии подобных находок, добытых в 2013 г. В процессе диагенеза, т.е. на этапе преобразования осадка в горную породу, череп оказался раздавлен, а его отдельные кости деформировались, растрескались и даже разрушились. В случае с кулиндийскими материалами разрушение часто происходит также и в результате вскрытия остатков во время сборов. Поэтому «череп» представлен на самом деле отпечатками деформированных костей. Эта особенность осложняет определение некоторых важных морфологических деталей и чревата ошибками, которых описание «кулиндадрома» не избежало.

Голотип «кулиндадрома» представлен отпечатком правой стороны черепа и верхней части его крыши без рострального кончика. Прорисовка деталей в целом не вызывает возражений, поскольку выстраиваемый морфологический «образ» достаточно обычен для представителей двуногих птицетазовых динозавров, в том числе для упомянутых выше орнитопод — гипсилофодонтид и джехолозаврид.

Вместе с тем, все отличительные признаки черепа, указанные в диагнозе «кулиндадрома», на самом деле ненадежны, поскольку их легко списать на специфику сохранности образца. Наибольшее возражение вызывает интерпретация дорсального отростка верхнечелюстных костей, у которого авторы таксона установили необычную редукцию его рострального отдела. Этот вывод целиком ос-





Реконструкция двух форм черепа гипсилофодонтид: «кулиндадрома» (а) из поздней юры Забайкалья и агилизавра (б) из средней юры Китая. Красным цветом отмечен фрагмент верхнечелюстной кости, который сомнительно реконструирован в качестве предчелюстной кости. У агилизавра на этом месте расположена часть верхнечелюстной кости. На черепах двух форм выражены надглазничные кости. Обозначения костей: Вч — верхнечелюстная, З — зубная, Зг — заглазничная, Кв — квадратная, Квс — квадратно-скуловая, Л — лобная, Н — носовая, Нг — надглазничная, Пл — предлобная, Ск — скуловая, Пч — предчелюстная, Сл — слезная, Т — теменная, Ч — чешуйчатая.

Здесь и далее рисунки В.Р.Алифанова

нован на произвольном допущении, что костный фрагмент, лежащий на голотипе впереди отростка (и отделенный от него широкой щелью), принадлежит предчелюстной кости.

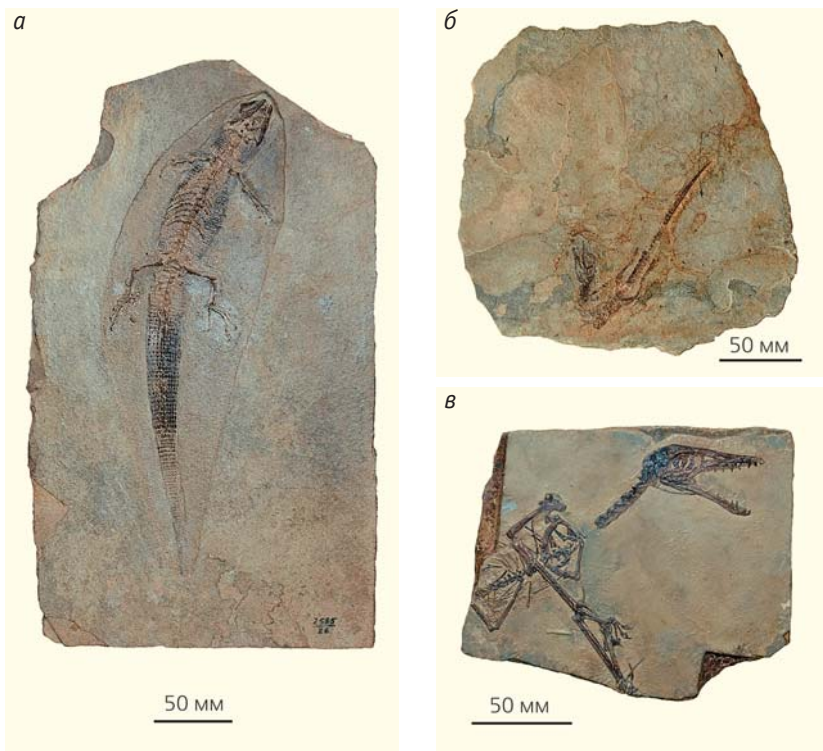
Между тем, если не отходить от «стандартов» строения черепа орнитопод (или птицетазовых динозавров в целом), спорный фрагмент может на самом деле составлять как раз недостающую часть дорсального отростка верхнечелюстной кости (странно, но такая возможность авторами обсуждаемого таксона даже не упоминалась). В этом случае реконструкция легко вписывается в структурный план широко распространенных в юре Центральной Азии динозавров из семейства гипсилофодонтид, и отчетливо проступает сходство «кулиндадрома», например, с хорошо известным агилизавром (*Agilisaurus*) из средней юры Китая [7]. Оно, кстати, наглядно проявляется в бумерангообразной форме надглазничных костей и в наличии выступа в их средней части (обычно это палочкообразные или каплевидные по форме элементы, предназначенные для защиты глаз сверху).

Все сказанное выше позволяет заключить, что образец, выбранный в качестве типового для «кулиндадрома», не демонстрирует специфических черт строения, достаточных для выделения новой формы. Сомнительно и определение его систематического положения. Наконец, отнесение к описанному в Science динозавру из Кулинды необычных чешуйчатых «хвостов» (о чем подробнее речь пойдет ниже) ошибочно. Уже один этот факт, увы, превращает «кулиндадрома» в химеру, т.е. в форму, составленную из частей, относящихся к разным таксонам.

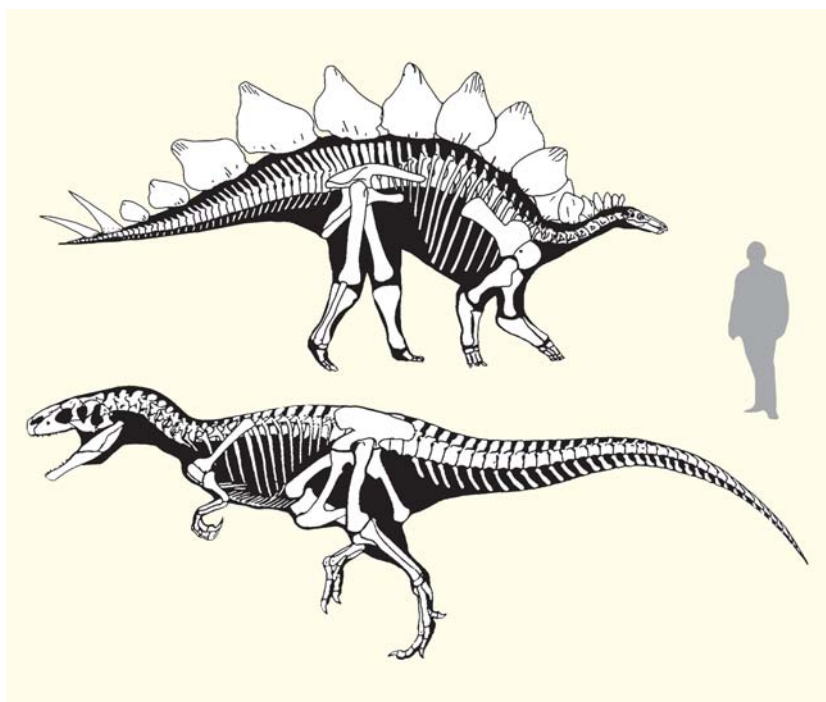
## Двуногие орнитоподы Центральной Азии

Данных о позднеюрских позвоночных в Азии мало. Еще недавно об их разнообразии судили главным образом по находкам из Каратау (местонахождение Аулие) в Южном Казахстане, богатого остатками растений, насекомых, рыб и наземных четвероногих. Среди последних отмечены хвостатые земноводные, ящерицы, черепахи, крокодилы и даже летающие ящеры — птерозавры.

Удивительно, но в Каратау остатков динозавров нет. Конечно, их разнообразие для того времени можно представить по находкам из других стран, прежде всего Китая. Тут в силу малого числа прямых фактов подойдет метод реконструкции. Например, он показывает, что в юре заметной группой были стегозавры (*Stegosauria*), о чем свидетельствуют их остатки в отложениях верхней половины юры и низов раннего мела. Нет сомнений, что рядом с ними обитали гетеродонтозавриды (*Heterodontosauridae*) — загадочные с точки зрения родственных связей птицетазовые динозавры. Представители этой группы известны на рубеже триаса и юры в Южной Африке, а в более позднее время — на всех северных континентах, в том числе и в Центральной Азии (ранний мел). Среди хищных динозавров доминировали обычно небольшие целурозавры (*Coeluria*) и крупные карнозавры (*Carnosauria*). Для второй половины юры в Центральной Азии постоянным элементом комплексов позвоночных были также завроподы из нескольких архаичных групп. Но роль истинных доминантов этого времени принадлежала орнитоподам — гипсилофодонтидам.



Разнообразие позднеюрских позвоночных Каратау: ящерица *Sharovisaurus* (а), крокодил *Karatausuchus* (б) и птерозавр *Sordes* (в). Эти и другие животные обитали в предшествующее укурейскому время, примерно в середине поздней юры.



Контурная реконструкция внешнего вида (с вписанным в нее скелетом) растительноядного стегозабра (вверху) и хищного карнозабра. Динозавры этих групп были наиболее обычными обитателями второй половины юры и начала мела на всех северных континентах.

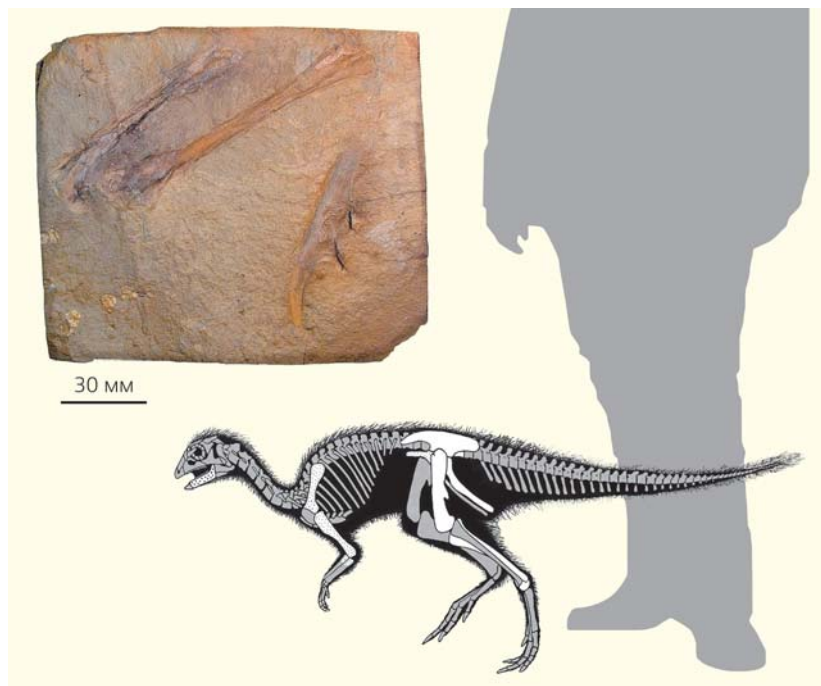
О том, что в Кулинде преобладают остатки гипсилофодонтид, свидетельствуют многочисленные образцы с отпечатками стержневидных седалищных костей, формирующих задне-нижнюю часть таза. На одном их конце развиты короткие сочленовные отростки для соединения с другими тазовыми костями, а на опущенном вниз стержневидном окончании выражен направленный вперед обтураторный отросток. Его наличие на образцах из Кулинды позволяет уверенно определить принадлежность даурозавра к данному семейству. В Кулинде есть и другой тип седалищных костей, характерный для кулиндаптерикса. Седалищные кости этого динозавра в нижней части расширены поперечно и формируют удлиненный симфиз при сочленении элементов правой и левой стороны, как это имело место у известного по полносkeletalным материалам джехолозабра (*Jeholosaurus*) из нижней мела Северо-Восточного Китая.

Сказать что-то определенное о представителях этих двух семейств из Кулинды пока сложно, поскольку материал фрагментарен и нет возможности уверенно отнести большую часть остатков к той или иной форме. Судя по всему, даурозавр напоминал упомянутого агилизабра, а кулиндаптерикс — джехолозабра. Возможно, кулиндийские орнитоподы отличались друг от друга особенностями строения покровных производных, которые имеют вид вытянутых структур. Они могут быть короткими, но иногда представляют собой очень длинные и спутанные образования. Последние, не исключено, принадлежали кулиндаптериксу.

Интересные выводы возникают, если для обсуждения кулиндийских орнитопод привлечь материалы по лесотозавридам (*Lesothosauridae*) и, в частности, по лесотозавру (*Lesothosaurus*) из нижней юры Южной Африки. Этот динозавр морфологически очень близок к двуногим орни-

топодам, но отличается от них рядом архаичных признаков черепа. Груз этих признаков настолько очевиден, что лесотозавра стали ставить в основание филогенетического дерева всех птицетазовых динозавров. Но такой взгляд — явное преувеличение, поскольку южноафриканский ящер не мог быть, скажем, предком стегозавров из-за определенных черт специализации, таких, например, как укорочение бедренных костей. Для того чтобы убедиться, что это, как говорят, продвинутая особенность, достаточно посмотреть на скелет любой ящерицы и обнаружить противоположное, т.е. короткие кости голени.

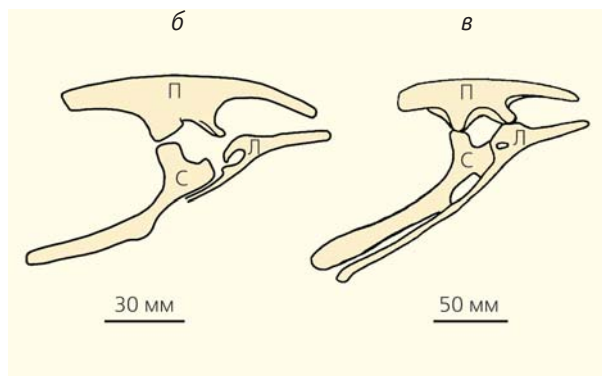
Однако современные исследования далеко не всегда опираются на оценку морфологических типов, выявляемых внутри исследуемых групп. Вместо этого доминирует так называемый кладистический метод реконструкции родственных связей, который подменяет собой анализ базовых планов организации. Он построен на странном, если не сказать ошибочном, представлении об «экономности» тех или иных эволюционных изменений как о главном критерии для построения филетических древ, с упором на количество, а не на качество учтенных признаков. В применении к анализу эволюции динозавров этот подход привел к отказу от ряда традиционных систематических групп, в том числе и от признания семейства гипсилофодонтид как естественного объединения. Однако мы считаем, что лесотозавриды, гипсилофодонтиды и джехолозавриды близки друг



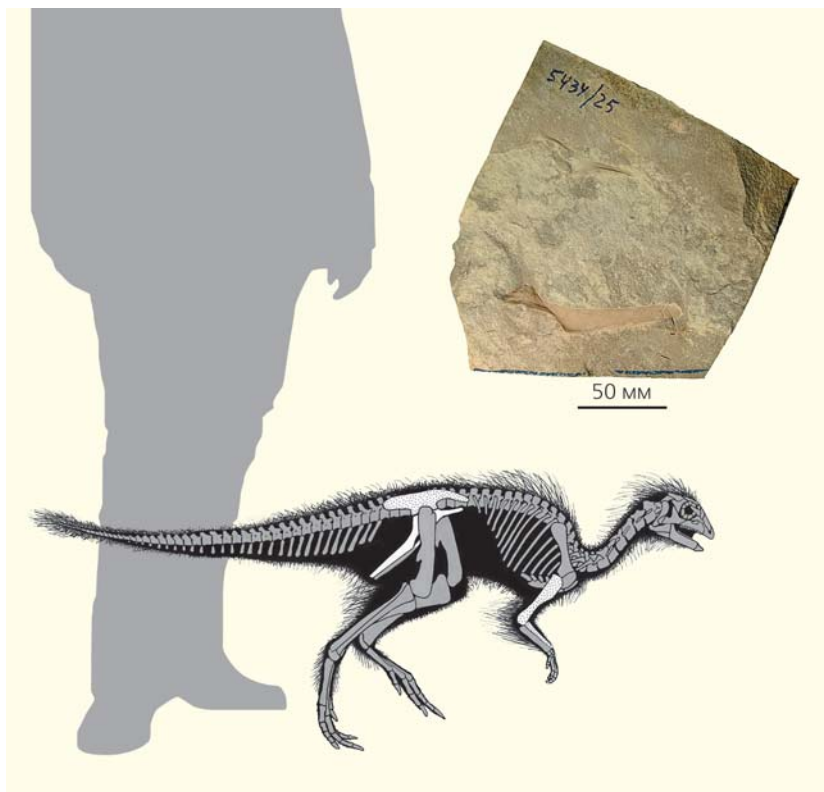
Часть скелета (подвздошная, бедренная и большая берцовая кости) на породе и контурная реконструкция внешнего вида (с вписанным в нее скелетом) даурозавра из семейства гипсилофодонтид. Белым цветом на реконструкции скелета обозначены известные элементы голотипа, а точками — элементы, предположительно отнесенные к данной форме.

к другу практически по всем основным морфологическим системам. На этом фоне примечательно лишь различие в строении их седалищных костей, проявляющееся, например, у даурозавра и кулиндаптерикса. Можно предположить, что эти два динозавра, а вместе с ними и представители гипсилофодонтид и джехолозаврид, отличались какими-то особенностями походки, движения хвоста или откладки яиц.

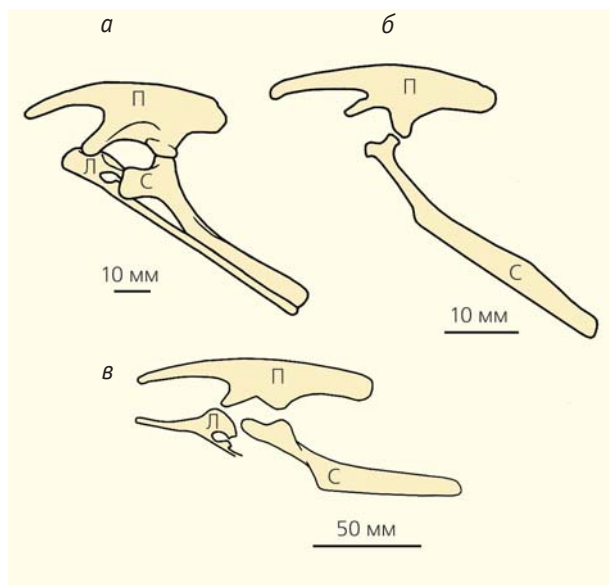
В целом, распределение сходств у представителей трех обсуждаемых семейств укладывается



Седалищная кость (а) и реконструкция таза (вид сбоку) даурозавра (б) в сравнении с тазом агилизавра (в). На нисходящем отростке седалищной кости всех гипсилофодонтид сформирован обтураторный отросток. Обозначения костей: Л — лобковая, П — подвздошная, С — седалищная.



Отпечатки седалищной и лобковой костей на породе и контурная реконструкция внешнего вида (с вписанным в нее скелетом) кулиндаптерикса из семейства джехолозаврид. Белым цветом показаны известные элементы голотипа, точками — предположительно отнесенные к данной форме.



Реконструкция таза (вид сбоку) некоторых гипсилофодонтией: лесотозавра (а), джехолозавра (б) и кулиндаптерикса (в). Выступ на седалищной кости всех трех форм, похожий на obturatorный отросток гипсилофодонтид, — это часть нижнего края тазового окна. Обозначения костей: Л — лобковая, П — подвздошная, С — седалищная.

в представлении о мозаичном ходе эволюционных процессов. При этом джехолозавриды могут рассматриваться как группа, обладающая переходными чертами от лесотозаврид к гипсилофодонтидам. Все эти семейства нами объединяются в особом инфраотряде орнитопод — *Nur-silophodontia*. О необходимости признания этой достаточно давно установленной группы говорилось и раньше [8].

Если судить по редким находкам, включая данные из Кулинды, джехолозавриды появились в конце юры и просуществовали почти весь ранний мел. Это исключительно азиатская по распространению группа. Гипсилофодонтиды, напротив, были широко расселены почти по всему свету и дожили до конца позднего мела в Северной Америке. В Центральной Азии эволюционная судьба этого семейства сложилась иначе. Его представители доминировали здесь во второй половине юры, начиная со средней, а потом внезапно исчезли к началу мела. Этот факт может быть объяснен на основе гипотезы конкурентного вытеснения.

В качестве конкурентов могли выступить гетеродонтозавриды, джехолозавриды и рогатые динозавры — пситтакозавры (*Psittacosauria*), ставшие самой заметной группой птицетазовых динозавров в раннем мелу Центральной Азии. Все они напоминают гипсилофодонтид покровами, зубной системой, двуногим хождением и размерами, за которыми стоит и сходство в биологии.

В позднем мелу гипсилофодонтиды появляются в Центральной Азии снова. Судя по недавним находкам из Монголии, они представлены североамериканской ветвью семейства. Однако многообразия эта группа достичь уже не смогла.

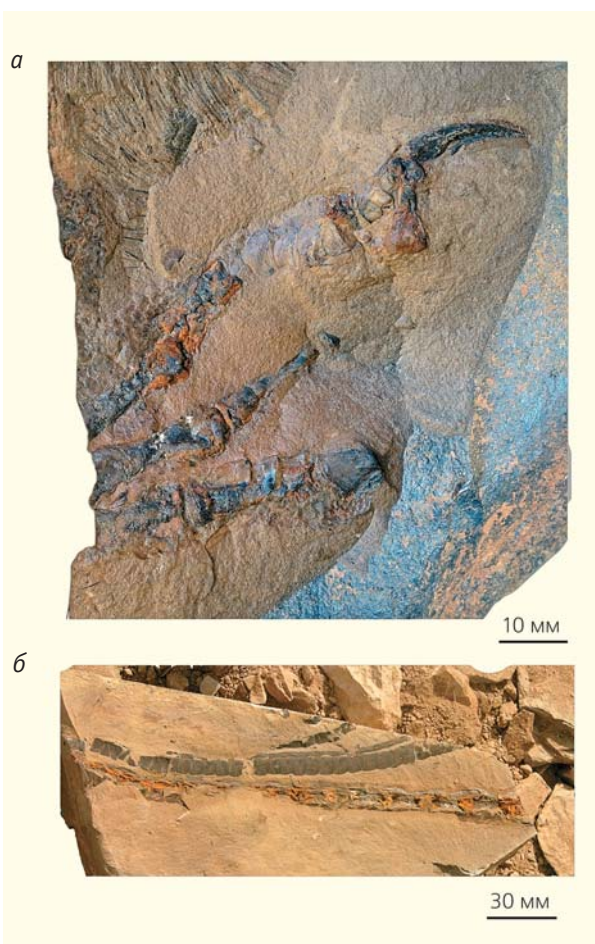
### Чешуйчатые орнитоимозавры

Вернемся к теме чешуйчатых хвостов, затронутой нами при обсуждении внешнего вида «кулиндадрома» и состава фауны динозавров Кулинды. Первые сохлещенные остатки хвостовой части скелета с чешуями были обнаружены в Кулинде летом 2011 г. В какой-то момент участникам экспедиции показалось даже, что непонятные цепочки крупных субпрямоугольных и серповидных по форме пластин на породе — это членики ископаемого червя. Но когда появились «членики» вместе с хво-

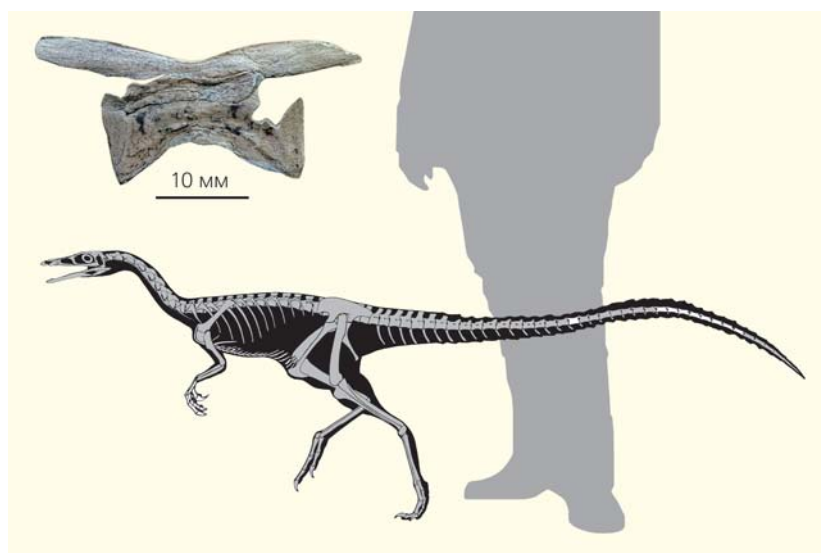
стовыми позвонками, стало очевидно: эти необычные образования — кожные чешуйки хвоста древнего ящера. В Кулинде находки таких сочлененных позвонков с остатками покровов — не редкость. Объяснение этому находится в строении чешуй. Они были достаточно крупными и имели прочное последовательное сцепление друг с другом, фиксируемое по наличию на них переходной зоны. Коллеги из параллельного проекта приписали такие находки своему «кулиндадрому», тогда как мы пришли к выводу, что сохраняющиеся вместе с чешуями хвостовые позвонки принадлежат хищным динозаврам тероподам, поскольку имеют характерную для них катушковидную форму тела. Строение соответствующих позвонков показывает также характерное для теропод слабое развитие остистого отростка и отчетливо выраженные длинные задние сочленовные отростки (у птицетазовых динозавров первый — обычно высокий и заметен даже на терминальных хвостовых позвонках, а вторые — в виде отростков не преобразованы).

Разрешить заочный спор помог обнаруженный еще в пробных сборах 2010 г. образец с остатками фрагмента трехпалой кисти. На нем, кроме фаланг и метакарпалей, имеются и отпечатки чешуй со следами такой же переходной зоны, как на чешуйчатых покровах спорных «хвостов». С помощью всех этих находок нам удалось описать нового динозавра — лепидохейрозавра, о котором уже говорилось выше [6]. В этом тероподе неожиданно удалось узнать представителя такой группы, как орнитомимозавры.

Орнитомимозавры — это некрупные хищные динозавры, которые известны по находкам их страусоподобных форм, обитавших в позднем мелу на территории Центральной Азии и Северной Америки. Представители этой группы отличаются длинной шеей, вытянутыми и беззубыми челюстями, длинными передними и сильными задними конечностями. Однако в случае с находкой из Кулинды речь идет об очень своеобразных орнитомимозаврах, близких к *Nqwebasaurus* из нижнемеловых отложений Южной Африки. В отличие от большинства более поздних и продвинутых азиатских и североамериканских форм, этот небольшой ящер, известный по значительной части скелета, обладал озубленными челюстями, архаичными чертами строения кисти и необычными стопами. Последние демонстрируют уникальное для теропод уменьшение проксимальной (ближней) головки четвертой (а не третьей) метатарзалии.



Остатки лепидохейрозавра: фрагмент левой кисти (а) и фрагмент хвоста с чешуями бокового ряда хвоста (б). Чешуи на образцах имеют сходную форму, на них также присутствует переходная зона — видимо, зона сцепления.



Хвостовой позвонок и контурная реконструкция внешнего вида (с вписанным в нее скелетом) лепидохейрозавра, архаичного орнитомимозавра из Кулинды.

Теперь с помощью данных из Кулинды можно заключить, что орнитомимозавры, подобные нквебазавру (нквебазавриды), были характерны не только для мела, но и для юры. Они были распространены шире, чем это можно было предположить по одной находке. В Центральной Азии нквебазавриды в послепермские времена не известны. За этим, не исключено, стоит конкурентный проигрыш более продвинутому раннемеловым орнитомимозаврам — гарпимимидам (*Harpymimidae*).

Заметим, что лепидохейрозавр из Кулинды обладал именно чешуйчатым типом покрова. Это примечательно потому, что в последнее время теропод вообще и орнитомимозавров в частности принято изображать оперенными. Однако известно немалое число хищных динозавров из разных групп с чешуйчатой кожей. Все эти данные свидетельствуют о большом разнообразии покровов в пределах крупных таксонов теропод. Более того, лепидохейрозавр имел не только простой (мелко- и среднебугорчатый), но и специализированный тип чешуйчатого покрова на хвосте и передних конечностях. Речь идет об упоминавшихся выше чешуях с переходной зоной.

Особенности строения таких чешуй на ладонной поверхности пальцев кисти и даже в области

метакарпалей (среднего отдела скелета кисти, или пясти) у орнитомимозавра из Кулинды заключаются в том, что они ориентированы поперек оси пальцев и выступают латерально в виде фестонов. Назначение последних неясно, но может быть объяснено (с учетом некомпактного строения кисти и способности использовать хвост в качестве движителя) как адаптация для плавания в воде. Плавательную способность хвоста можно определить по вытянутым вертикально чешуям нижнего ряда, а также по наличию выступающих вверх гребней на чешуях верхнего ряда. Если так, то передние лапы, скорее всего, позволяли поддерживать положение тела в воде и изменять направление его движения. Получается, что лепидохейрозавры искали добычу не только на мелководье.

О возрасте находок из местонахождения Кулиндя, о том, что собой представляют покровы двуногих птицеподобных динозавров и как они связаны с происхождением перьев динозавров и птиц, а также о значении забайкальских находок для решения некоторых проблем классификации и родственных взаимоотношений макротаксонов мезозойских архозавров будет рассказано в нашей статье в следующем номере журнала. ■

**Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 13-05-00302 и 16-05-00408) и акционерным некоммерческим обществом «Институт биомедицинских проблем» (грант «Палеонтология позвоночных»).**

## Литература

1. Godefroit P., Sinitsa S.M., Dhouailly D. et al. A Jurassic ornithischian dinosaur from Siberia with both feathers and scales // *Science*. 2014. V.345. №6195. P.451–455.
2. Алифанов В.Р. Об открытии позднеюрских динозавров в Забайкалье // Докл. РАН. 2014. Т.455. №4. С.412–423.
3. Савельев С.В., Алифанов В.Р. Новый тип кожных дериватов у птицеподобных динозавров из поздней юры Забайкалья // Докл. РАН. 2014. Т.456. №2. С.251–253.
4. Алифанов В.Р., Савельев С.В. Два новых птицеподобных динозавра (*Hypsilophodontia*, *Ornithopoda*) из поздней юры России // Палеонтол. журн. 2014. №4. С.72–82.
5. Алифанов В.Р., Савельев С.В., Терещенко Е.Ю. и др. Строение кожных покровов у птицеподобных динозавров (*Hypsilophodontia*, *Ornithopoda*) из поздней юры Забайкалья // Палеонтол. журн. 2014. №5. С.72–80.
6. Алифанов В.Р., Савельев С.В. Древнейший орнитомимозавр (*Theropoda*, *Dinosauria*) с отпечатками покровов из верхней юры России // Палеонтол. журн. 2014. №6. С.71–85.
7. Barret P.M., Butler R.J., Knoll F. Small-bodied ornithischian dinosaurs from the Middle Jurassic of Sichuan, China // *J. Vertebr. Paleontol.* 2005. V.25. №4. P.823–834.
8. Алифанов В.Р. Отряд *Ornithischia* // Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы. Ч.2 / Отв. ред. Е.Н.Курочкин, А.В.Лопатин. М., 2012. С.241–309.

# Русь, Россия и культуры Степного пояса: от аваров до Золотой Орды

Евгений Николаевич Черных подготовил для нас цикл из трех статей, посвященных непростым взаимоотношениям Руси и России с южными соседями — кочевыми и полукочевыми племенами Евразии. Не менее шести тысячелетий надежным доменом их культур служил Степной пояс, а захватнические устремления кочевников были нацелены, как правило, на юг, в зону оседло-земледельческих общностей. Однако после зарождения блока восточнославянских культур ситуация резко изменилась: протяженная зона сложных взаимодействий степняков с соседями шаг за шагом смещается к северу. В серии статей будут прослежены основные этапы этих контактов вплоть до современности.

Е.Н. Черных

Степной пояс Евразии в последние годы привлекает внимание многих российских и зарубежных археологов и историков. Этот домен мобильных кочевых и/или полуседлых скотоводов всегда выглядел весьма контрастным на фоне общностей, окружавших его: с севера — лесных охотников, рыболовов и собирателей, с юга — культур оседло-земледельческих. Однако жесткие взаимодействия (в очень широком хронологическом диапазоне — от 5-го тысячелетия до н.э. и едва ли не до самого недавнего времени) кочевых народов со столь непохожими на них соседями высветили особенности развития социальных объединений Евразии, заставившие исследователей подвергнуть ревизии традиционные представления о закономерностях развития их культур.

На страницах «Природы» уже не раз были затронуты многие аспекты этой сложной проблемы\*. Обсуждались структуры

\* В «Природе» опубликована серия статей автора, посвященная этой теме (2011. №7. С.3–13, №8. С.43–54; 2014. №9. С.48–59; 2015. №1. С.28–41, №2. С.43–55, №3. С.55–68, №4. С.44–57).



*Евгений Николаевич Черных, доктор исторических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий лабораторией естественно-научных методов Института археологии РАН. Область научных интересов — история технологий и структура древних культур и общностей Евразии.*

**Ключевые слова:** Степной пояс, Евразия, восточные славяне, кочевые культуры, монголы, Золотая Орда.

**Key words:** Steppe belt, Eurasia, East Slavs, nomadic cultures, Mongols, Golden Horde.

и важнейшие особенности кардинальных геоэкологических зон нашего материка по линиям Север—Юг и Запад—Восток.

Специалисты самых различных дисциплин неоднократно поднимали вопрос о реальной границе между Европой и Азией. Учитывая нередко впечатляющие расхождения между блоками важнейших культурных групп, можно полагать, что «водораздел» проходит отнюдь не по горному массиву Урала, а также по рекам Урал или Эмбе, либо по Маньчжурской впадине\*. Намного резоннее проводить рубеж от устья Дуная, совпадающего с западным флангом Степного пояса, до Восточной Балтики. Думается также, что намного вернее видеть в этом расчленении не долготную и строго прочерченную линию с севера на юг, но относительно широкую — порой до 500 км — полосу, например, от Восточных Карпат до Правобережного Поднепровья. Характер же реконструируемой разграничительной полосы

\* Подробнее см.: Черных Е.Н. Структура Евразийского мира на фоне геоэкологии после открытия металлов // Природа. 2011. №8. С.43–54.



Границы между Европой и Азией: реальная (1) и принятая в большинстве стран (2).

будет гораздо яснее, если учитывать маятниковые колебания продвижений культур. Ранняя и весьма длительная по времени миграция народов с запада на восток происходила с 5-го по 1-е тысячелетие до н.э. Поздний рывок в противоположном направлении был намного короче — с IV–V по XIV–XV вв. н.э. И этот вал завоевательных миграций именуется *тысячелетием Востока\**.

По странной игре случая именно с восточной волной оказались связаны начальные шаги *восточнославянских* групп, из которых затем выросли этносы российские. Генетические корни этих кланов вызревали, конечно же, в культурном «котле» Европы. Однако поразительно долгим — в полтора тысячелетия — оказалось время их тесных, весьма разнообразных и порой удрушающих взаимодействий с восточными общностями во многом им чуждого *тысячелетия*.

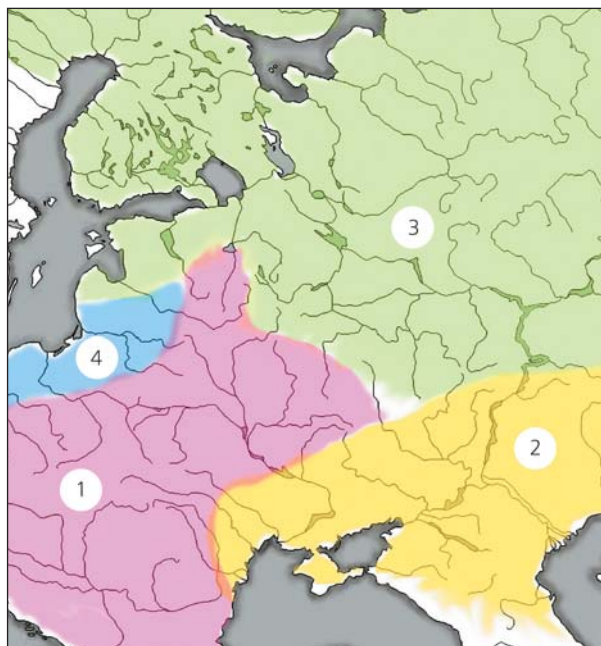
### «Откуда есть пошла русская земля»...

Около 1100 г. Нестор-летописец, автор самой почитаемой и древнейшей в изначальной российской истории летописи — «Повести временных лет»\*\*, сообщил своим ближним и дальним потомкам, что *по разрушении же столта [вавилонского] и по разделении народов взяли сыновья Сима восточные страны, а сыновья Хама — южные страны, Иафетовы же взяли запад и северные страны. От этих же 70 и 2 язык произошел и народ славянский, от племени Иафета — так называемые норики, которые и есть славяне. Спустя много времени сели славяне по Дунаю, где теперь земля Венгерская и Болгарская. От тех славян разошлись славяне по земле и прозвались*

*именами своими от мест, на которых сели. <...> Славяне пришли и сели по Днепру и назвались полянами, а другие — древлянами, потому что сели в лесах, а другие сели между Припятью и Двиною и назвались дреговичами, иные сели по Двине и назвались полочанами, по речке, впадающей в Двину, именуемой Полота, от нее и назвались полочане. Те же славяне, которые сели около озера Ильменя, назывались своим именем — славянами, и построили город, и назвали его Новгородом. А другие сели по Десне, и по Сейму, и по Суле и назвались северянами. И так разошелся славянский народ, а по его имени и грамота назвалась славянской.*

Полностью соглашался с этим виднейший историк и автор знаменитой 29-томной российской истории Сергей Михайлович Соловьев (1820–1879): *Это предание включает в себе факт, не подлежащий никакому сомнению, древнее пребывание славян в придунайских странах оставило ясные следы в местных названиях; сильных врагов у славян на Дунае было много: с запада кельты, с севера — германцы, с юга — римляне, с востока — азиатские орды; только на северо-восток открыт был свободный путь, только на северо-востоке славянское племя могло найти себе убежище [1, т.1, с.85].*

Широкое историческое полотно-реконструкция Нестора оказалось во многом созвучным не только мыслям Соловьева, но и взглядам современных археологов и лингвистов. Выглядело это созвучие, пожалуй, довольно редким фактом со-



Восточная Европа: ареалы расселения важнейших этнолингвистических групп населения в середине и второй половине 1-го тысячелетия. Группы популяций: 1 — славянские, 2 — тюркские, 3 — финно-угорские, 4 — летто-литовские.

\* Подробнее см.: Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: тысячелетие кочевников Востока // Природа. 2015. №4. С.44–57.

\*\* Здесь и далее «Повесть временных лет» приводится в переводе Д.С.Лихачева.



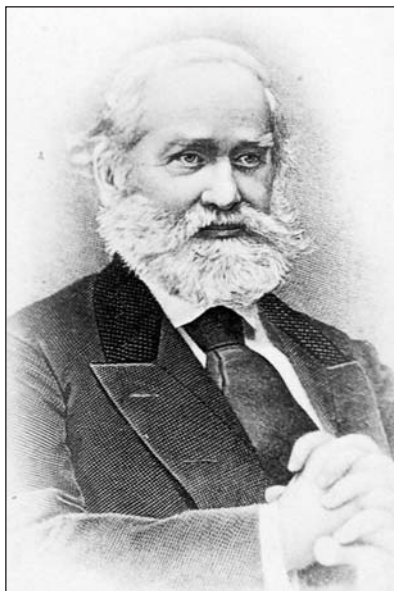
гласия: ведь в истории Руси и России трудно указать на хотя бы одну сколько-нибудь примечательную проблему, вокруг которой не вспыхивали бы ожесточенные баталии. Но в этом случае большинство специалистов по археологии раннего Средневековья без особых дискуссий соглашаются, что примерно в V–VII вв. на широких пространствах от Вислы и Западного Буга до Волхова, Среднего Поднепровья, Днестра, Южного Буга и Десны, т.е. на территории до 0.8–1.0 млн км<sup>2</sup>, появилось новое население, в котором нетрудно было распознать исходные группы восточнославянских племен [2]. На то же время, уже согласно мнению палеолингвистов, приходились и процессы распада общеславянского языка, когда в огромном лингвомассиве индоевропейской семьи наметилось явное вычленение важнейших диалектов или же грядущих славянских локальных языков [3, 4].

При этом обязательно добавлю, что исходные передвижения популяций восточных славян совпали не только с *тысячелетием Востока*, но и с гораздо более всеохватным феноменом общеевразийского характера — с турбулентной и взрывной эпохой Великого переселения народов\*.

### Скверная экология, скверные соседи

Позднейшим исследователям каким-то образом удалось прийти к заключению, что устремленным на восток и преодолевшим символическую полосу евро-азиатского «водораздела» славянам не очень повезло с выбором места своего нового обитания — устойчивого домена лесных финно-угорских народов. Соловьев, например, начал свой труд следующими словами: *Перед нами обширная равнина: на огромном расстоянии от Белого моря до Черного и от Балтийского до Каспийского путешественник не встретит никаких сколько-нибудь значительных возвышений, не заметит ни в чем резких переходов. Однообразие природных форм исключает областные привязанности, ведет народонаселение к однообразным занятиям; однообразие занятий производит однообразие в обычаях, нравах, верованиях; одинаковость нравов, обычаев и верований исключает враждебные столкновения...* <...>

\* Подробнее см.: Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: тысячелетие номадов Востока // Природа. 2015. №4. С.44–57.



Сергей Михайлович Соловьев, автор знаменитой «Истории России с древнейших времен».

*Составляя восточную часть Европы, отличаясь климатом суровым, представляя на юго-востоке степь, населенную кочевыми племенами, сменявшими друг друга в постоянном стремлении из Азии, на северо-западе — страну, покрытую девственными лесами, наполненную реками, озерами, болотами, среди которых кое-где блуждали орды звероловов, Великая равнина не могла получить скоро многочисленного народонаселения...* <...>

*Однообразна природа Великой восточной равнины, не по разит она путешественника чудесами...* [1, т.1, с.56–59].

К этому пассажи Соловьева непременно добавлю, что гораздо более неприятным моментом в *унылом однообразии природы* Восточной Европы стал, конечно же, не дефицит здесь *значитель-*

*ных возвышений*. Несопоставимо сильнее сказывалось едва ли не полное отсутствие на этих громадных пространствах рудных месторождений. Зависимость от западных источников металла фактически до начала XVIII в., т.е. до времени Петра I, очень болезненно отражалась на характере развития ранних (да и не только ранних) культур Руси и России.

Однако этот чрезвычайно досадный «геоэкологический пробел» не удостоился внимания наших ведущих историков двух прошлых столетий. В их понимании гораздо худшим на фоне унылой экологии оказалось для русских окружение, а именно скверные соседи, особенно южные, со стороны степи: *Русское государство основалось в той стране, которая до него не знала истории, в стране, где господствовали дикие кочевые орды, в стране, которая служила широкою открытою дорогой для бичей Божиих, для диких народов Средней Азии, стремившихся на опустошение Европы.* <...>

*Долгое время все внимание русского человека было обращено на Восток, к миру степных, хищных варваров, народов кочевых, нехристианских, стоявших на низшей ступени развития, чем народ русский. Русский человек сознал свое резкое отличие от этих народов и, находясь в том возрасте, когда преобладает чувство, сознал свое резкое отличие от степного варвара в религии; не русский и татарин, но христианин и бусурманин, или поганый, вот какие представления были наперед; здесь прошла резкая нравственная граница между русской народностью и азиатским миром* [1, т.18, с.18–19, 27].

В этих красноречивых строках выдающегося историка, пожалуй, уже было заложено оправдание отсталости и неразвитости российского общества,

которые по своей сути предопределены скверной экологией и дикими соседями. Такое объяснение в последующие десятилетия станет воистину базовым. Варианты подобного оправдания будут звучать постоянно, в разные годы из уст и писаний самых различных по политической ориентации авторов, вплоть до революционных перемен 1917 г. Позднее, уже в советское время, самым расхожим объяснением отставания царской России от западных стран служило ходульное выражение *триста лет татаро-монгольского ига*. Тяжкое ярмо оказалось столь невыносимым, что его последствия сказывались вплоть до XX в.\*

Вообще-то, в высказываниях Соловьева, как и в приведенном выше расхожем объяснении советского времени, таятся два труднообъяснимых противоречия. Так, утверждение историка, что *одинаковость нравов, обычаев и верований исключает враждебные столкновения*, абсолютно не согласуется с весьма долгим периодом феодальной раздробленности Древней Руси. Русские князья в течение многих столетий, вплоть до сложения централизованной Московской Руси, не могли вырваться из клоаки кровавых споров и междоусобиц. Также хорошо известно, что факт этих бесконечных сражений служил для историков дежурным аргументом при объяснении стремительного поражения Руси от монголов в XIII в. Не подлежит сомнению и то, что вся история русского этноса в жестких рамках *тысячелетия Востока* густо окрашена сложными, зачастую весьма кровавыми взаимоотношениями с культурами кочевых скотоводов Степного пояса. Но при сравнении с другими странами удивить этим довольно трудно. К примеру, разнообразие государств Средней (Поднебесной) Китайской империи более трех тысячелетий находилось в подобных и, уж конечно, не менее тяжелых, сложных и тесных взаимосвязях со степняками-номадами.

### Кратко об основных этапах развития Руси и России

За более чем тысячелетний период сосуществования Руси и России с миром кочевников их взаимоотношения прошли несколько последовательных фаз. Самым тяжелым и кризисным оказался, без всякого сомнения, монгольский период, связанный с завоеваниями Чингизидов и господством Золотой Орды с 1238/1240 по 1480 г. Поэтому весь последовательный ряд этапов — с самого начала появления в бассейнах от Днестра до Днепра восточных славян и формирования княжеств Киевской Руси вплоть до покорения севера Евразии — очень часто так и делят на *домонгольский* и *собст-*

*венно монгольский*. В последующем, уже *постмонгольском* времени можно наметить до четырех этапов. Первым из них стал период до сокрушения Иваном Грозным Казанского ханства и появления за Уралом казачьего отряда атамана Ермака; ко второму относится завоевание и колонизация всей Сибири до тихоокеанского побережья; третий, имперский, период — со времени Петра Великого вплоть до покорения в 19-м столетии Российской империей культур скотоводов на всей западной половине Степного пояса и, наконец, последний — с 1917 г. до настоящего времени.

### Домонгольский период: авары, хазары, печенеги

Вслед за появившимися с Востока гуннами\*\* в VI в. на земли Северного Причерноморья навалились *авары*, или же *обры*, как их именует летопись: *Когда же славянский народ, как мы говорили, жил на Дунае, пришли от скифов, то есть от хазар, так называемые болгары, и сели по Дунаю, и были поселенцами на земле славян. <...> В те времена существовали и обры, воевали они против царя Ираклия и чуть было его не захватили. Эти обры воевали и против славян и притесняли дулебов — также славян, и творили насилие женам дулебским... Бог истребил их, умерли все, и не осталось ни одного обрина. И есть поговорка на Руси и доныне: «Погибли, как обры»... После обров пришли печенеги, а затем прошли черные угры мимо Киева, но было это после — уже при Олеге.*

Гораздо чаще обров в «Повести временных лет» упоминаются тюркоязычные *печенеги*. Они кочевали здесь с IX по XI в., и у славян от этих кочевников сохранились малоприятные впечатления. На крайней западной половине Степного пояса народ кочевых печенегов был не одинок: здесь пасли свои стада и иные группы тюркоязычных степняков. Судя по всему, для Руси более знатными и, разумеется, более могущественными в сравнении с печенегами стали, конечно же, *хазары*. Многие исследователи полагают, что первоначально хазары представляли крайний западный фланг необъятного Тюркского каганата, раскинувшего свое влияние от Китая и Маньчжурии до Византии. Во всяком случае, тюркские конные отряды в 570–580 гг. появились в Крыму, атакуя византийские поселения и крепости. Однако уже в 603 г. этот могучий, но внутренне рыхлый гигант распался на враждующие между собой Восточный и Западный каганаты. Примерно к 745 г. завершил свою историю Западный каганат, распространявший влияние на всю западную половину Степного пояса.

В ведении собственно Хазарского каганата находились степные земли от Северного Причерно-

\* Лишь сравнительно недавно, в «Краткой истории СССР» (ч.1. изд.3. Л., 1978), срок ига — теперь уже монголо-татарского — с 300 лет «сократили» до 240.

\*\* Подробнее см.: Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: тысячелетие кочевников Востока // Природа. 2015. №4. С.44–57.

морья до Северного Прикаспия, охватывавшие бассейны рек Кубани и Терека в Предкавказье, а также Днепра, Дона, Волги и Урала. Долгая борьба славян с хазарами уподобляется в «Повести временных лет» одному из главных событий древнейшей истории евреев — выводу Моисеем своего народа из египетского плена (что приравнивалось комментаторами к победе). Похожей кажется летописцам и история со степняками: *Так же и эти: сперва властвовали, а после над ними самими властвуют; так и есть: владеют русские князья хазарами и по нынешний день.* Разгром их пришелся на долю киевского князя Святослава, но случилось это уже существенно позднее: *В год 6473 (965). Пошел Святослав на хазар. Услышав же, хазары вышли навстречу во главе со своим князем каганом и сошлись биться, и в битве одолел Святослав хазар и столицу их и Белую Вежу взял.*

## Возврат на 100 лет

Здесь мы вернемся на столетие назад — к Рюрику и Олегу. Годом 862-м в «Повести временных лет» отмечен, пожалуй, один из самых примечательных и вызывающих донныне яростные дискуссии отрывок: *В год 6370 (862). Изгнали [славяне] варяг за море и не дали им дани, и начали сами собою владеть, и не было среди них правды, и встал род на род, и была у них усобица, и стали воевать друг с другом. И сказали себе: «Пошщем себе князя, который бы владел нами и судил по праву». И пошли за море к варягам, к руси. Те варяги назывались русью, как другие называются шведы, а иные норманны и англй, а еще иные готландцы, — вот так и эти. Сказали руси чудь, словене, кривичи и весь: «Земля наша велика и обильна, а порядка в ней нет. Приходите княжить и владеть нами». <...> И от тех варягов прозвалась Русская земля.*

С тех пор и начинается многовековая история восточнославянских народов, объединенных именем Русь. Отсюда исходят истоки первой русской династии Рюриковичей. Вещий Олег стал вторым после легендарного Рюрика князем новой династии. Многие же и донныне почитают Олега истинным основателем древнерусского государства. *В год 6387 (879). Умер Рюрик и передал княжение свое Олегу — родичу своему, отдав ему на руки сына Игоря, ибо был тот еще очень мал.*

По всей вероятности, в ходе бесчисленных боев и стычек со степными отрядами древнерусское военное дело не могло не испытать воздействия тактических приемов и уловок кочевников. Это можно заметить хотя бы по описанию также чрезвычайно знаменитого в истории Древней Руси князя Святослава Игоревича, внука Олега. *Когда Святослав вырос и возмужал, стал он собирать много воинов храбрых, и быстрым был, словно пардус [леопард], и много воевал. В походах же не возил за собою ни возов, ни котлов, не варил мяса, но, тон-*

*ко нарезав конину, или зверину, или говядину и зажарив на углях, так ел; не имел он шатра, но спал, постилая потник с седлом в головах, — такими же были и все остальные его воины.*

Князь явно предпочитал жизнь воина-кочевника, к тому же говорил: *Не любо мне сидеть в Киве, хочу жить в Переяславце на Дунае — ибо там середина земли моей, туда стекаются все блага: из Греческой земли — золото, паволоки, вина, различные плоды, из Чехии и из Венгрии серебро и кони, из Руси же меха и воск, мед и рабы.*

Однако в 972 г. по возвращении из Болгарии князя подкараулили его недавние союзники печенеги: *Когда наступила весна, отправился Святослав к порогам. И напал на него Куря, князь печенежский, и убили Святослава, и взяли голову его, и сделали чашу из черепа, оковав его, и пили из него. <...> А всех лет княжения Святослава было 28.* Н.М.Карамзин комментировал его гибель скорбными словами: *Таким образом скончал жизнь сей Александр [Македонский] нашей древней Истории.*

## Половцы

Эти тюркоязычные племена в жизни древнерусских княжеств играли роль совершенно особую. Именно поэтому половецким кочевникам «Повесть временных лет» уделяет намного больше внимания, нежели всем прочим. Вот, к примеру, как впервые Русь узнает об этом новом для нее народе: *В год 6562 (1054). <...> В том же году приходил Болуш с половцами, и заключил мир с ними Всеволод, и возвратились половцы назад, откуда пришли... Однако тот краткий визит оказался лишь разведкой. В год 6569 (1061). Впервые пришли половцы войною на Русскую землю; Всеволод же вышел против них месяца февраля во 2-й день. И в битве победили Всеволода и, повоював землю, ушли. То было первое зло от поганых и безбожных врагов.*

И с тех пор более 160 лет, вплоть до битвы с монголами на р.Калке в 1223 г., крутился непрестанный хоровод мелких и крупных стычек и битв русских князей с половецкими конными отрядами. Мелькал бесконечный калейдоскоп княжеских имен, бесчисленных противостояний между княжествами, непрочных и почти незамедлительно распадающихся союзов, ближних и дальних рейдов вооруженных групп — именно об этом идет постоянная речь в повествованиях «Повести временных лет».

*В год 6576 (1068). Пришли иноплеменники на Русскую землю, половецкое множество. Изяслав же, и Святослав, и Всеволод вышли против них на Альту. И ночью пошли друг на друга. Навел на нас Бог поганых за грехи наши, и побежали русские князья, и победили половцы. Но вот и скорый реванш Святослава: ...когда половцы воевали по земле Русской, а Святослав был в Чернигове, и когда половцы стали воевать около Чернигова, Святослав, собрав не-*

большую дружину, вышел против них к Сновску. И увидели половцы идущий полк, и приготовились встретить его. И Святослав, увидев, что их множество, сказал дружине своей: «Сразимся, некуда нам уже деться». И стегнули коней, и одолел Святослав с тремя тысячами, а половцев было 12 тысяч; и так их побили, а другие утонули в Снови, а князя их взяли в 1-й день ноября. И возвратился с победою в город свой Святослав.

В 1078 г. уже сами русские князья привели половцев на Русь и пошли на Всеволода: В год 6587 (1079). Пришел Роман с половцами к Воиню. Всеволод же стал у Переяславля и сотворил мир с половцами. И возвратился Роман с половцами назад, и убили его половцы, месяца августа во 2-й день. И доселе еще лежат кости его там, сына Святослава, внука Ярослава.

Одно из самых тяжелых поражений русское войнство потерпело в 1093 г., в битве под Трипольем в Среднем Поднепровье и при осаде половцами г.Торческ: Половцы же между тем осаждали Торческ, а торки противились и крепко бились из города, убивая многих врагов. Половцы же стали налегать и отвели воду, и начали изнемогать люди в городе от жажды и голода. И прислали торки к Святополку, говоря: «Если не пришлешь еды, сдадимся». <...> И стояли около города 9 недель... Святополк же вышел на Желань, и пошли друг против друга, и сошлись, и началась битва. И побежали наши от иноплеменников, и падали, раненые, перед врагами нашими, и многие погибли, и было мертвых больше, чем у Треполя. <...> Это Бог напустил на нас поганых, не их милуя, а нас наказывая, чтобы мы воздержались от злых дел. Наказывает он нас нашествием поганых; это ведь бич его, чтобы мы, опомнившись, воздержались от злого пути своего. <...> И был плач велик в земле нашей, опустели села наши и города наши, и бегали мы перед врагами нашими.

В этом отрывке перед нами предстает весьма стандартное объяснение поражений: за грехи наши великие и неправды. Не прошло и года, как повторяется печальная история уже с предательством: Сотворил мир Святополк с половцами и взял себе в жены дочь Тугоркана, князя половецкого. В тот же год пришел Олег с половцами из Тмутаракани и подошел к Чернигову, Владимир же затворился в городе. Олег же, подступив к городу, пожег вокруг города и монастыри пожег. Владимир же сотворил мир с Олегом и пошел из города на стол отцовский в Переяславль, а Олег вошел в город отца своего. Половцы же стали воевать около Чернигова, а Олег не препятствовал им, ибо сам повелел им воевать. Это уже в третий раз навел он поганых на землю Русскую, его же грех да простит ему Бог, ибо много христиан загублено было, а другие в плен взяты и рассеяны по разным землям.

Однако счастье переменчиво, и наконец в 1103 г. удача повернулась лицом к русским кня-

зьям. Но и здесь объяснения были стандартными: в случае поражения *покарал Господь за грехи наши тяжкие*, в случае победы — *даровал нам Господь победу за наше благочестие*.

Раздел о половцах хотелось бы завершить упоминанием о хрестоматийно известном — я абсолютно уверен в этом — всем нашим читателям «Слове о полку Игореве». Основной пафос этого поразительного сочинения, конечно же, в горечи от неистребимых склок, интриг и сражений, в которых виноваты не *грехи наши тяжкие*, но сами русские князья. Автор произведения вспоминает и давние страницы русской истории: *И застонал, братья, Киев от горя, а Чернигов от напастей. Тоска разлилась по Русской земле, печаль обильная течет среди земли Русской. А князья сами на себя крамолу ковали, а неверные сами, с победами набегая на Русскую землю, брали дань по серебряной монете со двора.* <...>

*Ярославичи и все внуки Всеславы! Опустите стяги свои, вонзите в землю свои мечи, покрытые позором, ведь уже выпали вы из дедовской славы. Ведь своими раздорами вы начали наводить неверных на землю Русскую, на богатства Всеслава, из-за раздоров случилось насилие от земли Половецкой!* [5, с.157–162, 277–280].

В последний раз мы услышали в русских хрониках рассказ о половцах, когда весной 1223 г. сокрушительные удары монгольских туменов по ведомой ханом Котьяном половецкой орде отбросили ее под стены Киева. Половецкий вождь запросил помощи у своего зятя — князя галицкого Мстислава Удалого: *Нашу землю нынче отняли татары, а вашу завтра возьмут, защитите нас; если же не поможете нам, то мы будем перебиты нынче, а вы — завтра.* Русские князья не отказали, и союзное русско-половецкое войско двинулось на монголов. От Киева до речки Калки, близ Азовского моря, по прямой линии примерно 650 км. Стало быть, реальное расстояние, которое преодолели конные отряды, составило не менее 800–900 км. Монголы заманивали союзников до Калки 12 дней, и проходить они должны были в таком случае ежедневно по 65–75 км. Напряжение немалое! Однако вряд ли есть смысл описывать эту столь трагичную для русских князей битву: исход ее также широко известен. Ведь фантастичный по достигнутым результатам поход двух туменов Джебе и Субэдэя служил лишь разведывательной операцией грядущих завоевателей Руси\*.

### Четыре года и четыре волны Батыева нашествия

Спустя 14 лет после битвы на Калке монгольские отряды Бату-хана (или Батые, как его принято на-

\* Подробнее см.: Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: тысячелетие номадов Востока // Природа. 2015. №4. С.44–57.

зывать в русской транскрипции) вновь надвинулись на восточные рубежи Руси. Странно, конечно (а может, и совсем не странно), но русские князья никаких уроков из трагичной битвы на Калке не извлекли. Так или иначе, но в конце 1237 г. первыми, кто ощутил на себе непростибельный промах своих вождей, оказались обитатели Рязанского княжества: именно их буквально испепелил огонь нового нашествия. Пять дней осады — с 16 по 21 декабря — решили дело: Старая Рязань оказалась стертой с лица земли. Через несколько дней вслед за Рязанью наступила очередь Коломны (1 января 1238 г.). Первые три исключительно жестоких месяца 1238 г. стали неповторимо трагичными для Древней Руси. Удары следовали с поразительной быстротой: Москва пала 20 января, а за ней та же участь постигла Владимир (7 февраля). Лишь за один февраль этого мрачного года монгольским отрядам удалось захватить и разорить 14 городов, не считая мелких поселений: Суздаль, Юрьев-Польской, Ростов Великий, Городец, Галич, Кострому, Вологду, Ярослав, Углич и ряд других. На этом трагичном фоне всегда и особым образом историки отмечают семинедельную осаду Козельска — небольшого городка на востоке Черниговского княжества: «сидение» монголов под Козельском заняло у победителей едва ли не половину времени всей их первой волны завоеваний.

Вторая волна явилась через несколько месяцев — осенью 1238 г. — и завершилась в начале 1239 г. Были захвачены и разорены города бассейна Среднего Поволжья и Оки: Нижний Новгород, Гороховец, Городец, Муром. Третья волна (конец 1239 — начало 1240 г.) ударила по Черниговскому княжеству, когда были взяты столица княжества Чернигов, а также Путивль и другие городки. Четвертая волна оказалась последней в этом трагичном ряду. Она накатила во второй половине 1240 г. и с чрезвычайной суровостью сокрушила южные княжества Руси. Наиболее горестным эпизодом этой бойни предстала, безусловно, гибель Киева. В начале сентября Батыева орда окружила «мать городов русских», а после осады — в конце ноября или в самом начале декабря — рухнула Десятинная церковь, последний оплот пытавшихся сопротивляться киевлян.

На этом, собственно, и завершилось покорение Руси. Бату-хан отправился далее на запад, по областям Польши и Венгрии. В 1241 г. он достиг берегов Адриатики, после чего повернул назад. Тогда до ушей наследников Чингисхана донеслись первые тревожные звуки начавшихся внутренних борений в еще недавно казавшемся столь монолитным организме Великой Монгольской империи: в ее далеком центре скончался хан Угэдей, любимый сын Чингисхана.

С этих нескольких лет (1237–1241) советские историки и начинали отсчитывать знаменитые *триста лет татаро-монгольского ига*.

## Монгольское иго и русские князья

Нет слов: те мрачные столетия, безусловно, относились к наиболее драматическим в российской истории. И что же сказать относительно ее уроков для древнерусской элиты? Князей ничему не научила битва на Калке. Им не пошла впрок и наука тяжких междоусобиц половецкого периода. Приведу слова Соловьева, которые могут быть едва ли не эпиграфом и выразительной картинкой для Руси XIII—XIV вв. Выдающийся историк показывает эту картинку в безумно длинном предложении, которое своей растянутостью как нельзя более полно отражает всю тягостную ситуацию с междоусобицами: *По смерти [Александра] Невского Ярославу тверскому помешал усилиться Василий костромской, но сам умер скоро и беспотомственно, очистив таким образом старший стол для сыновей Невского; здесь повторяется то же явление: Димитрию переяславскому мешают усилиться Андрей городецкий; начинается продолжительная усобица, во время которой старшие Александровичи истощают свои силы, не могут сделать ничего для своего потомства, притом же сын Димитрия умирает бездетным; а между тем во время усобицы князей переяславского и городецкого в тиши усиливаются два княжества: Тверское... и Московское — при младшем сыне Невского, Данииле. Соперничество между ними по этому самому необходимо; но будет ли это соперничество последним?* [1, т.4, с.441]. Соловьев задает этот вопрос, разумеется, риторически — ведь он точно знает на него ответ: совсем не последним!

Есть, конечно, принципиальное отличие между усобицами в половецкий период и во время под монгольской пятой. При половцах князья интриговали друг против друга, сражались между собой и с половцами на равных, обращаясь к «мерзким язычникам» половцам за помощью, когда им очень хотелось скинуть с престола своего соседа — соплеменника и единоверца. Теперь же, чтобы свершить то же самое в отношении неизбежного тебе русского князя, нужно было отправляться в дальний и не всегда надежный путь, в Нижнее Поволжье, в Орду, с богатыми подарками и даже с аманатами-родичами. А то и гораздо дальше — в Каракорум, но до него ведь не менее 5 тыс. совсем нелегких верст. Нужно было сильно унижаться, чтобы снискать ханское расположение.

Нет никакого смысла прибегать к перечислению всего хоровода княжеских заискиваний. Обратимся лишь к двум примерам в отношении персон, наиболее заметных в нашей истории, — к канонизированному церковью Александру Невскому и собирателю Московского княжества Ивану Калите. Александр Ярославич (Невский) стал княжить в Новгороде с 1236 г. В 1240 г. нанес известное поражение шведам на Неве. *Новгородцы любили видеть Александра в челе дружин своих; но недолго могли ужиться с ним как с правите-*

лем, ибо Александр шел по следам отцовским и дедовским: в самый год Невской победы он выехал из Новгорода, рассорившись с жителями. <...>

...Жалобы граждан на... самовластие [Александр] остались в договорах их с братом Александровым. В 1242 г. (видимо, зимой) он мчит в Орду, поскольку Батый прислал ему недвусмысленное предупреждение: Мне покори́л бог многие народы, неужели ты один не хочешь покориться моей державе? Если хочешь сберечь землю свою, то приходи поклониться мне и увидишь честь и славу царства моего. После этого визита он поспекает на свою вторую, еще более славную победу: 5 апреля состоялось знаменитое Ледовое побоище на Чудском озере.

Затем, однако, начались неприятности с братьями и великие споры между ними за право княжения в том или ином городе. Во время очередного посещения Орды Александр с [братом] Андреем имели... большой спор, кому быть во Владимире, кому — в Киеве, и хан отдал Киев Александру, а Владимир — Андрею... <...> Но Александр, как старший, не мог быть доволен таким решением, ибо давно уже Владимир получил первенство над Киевом... давно уже киевские князья не могли быть без владимирских... Киев представлял одни развалины, владение им не могло быть лестно. <...> ...В 1252 году Александр отправился на Дон к сыну Батыеву Сартаку с жалобой на брата, который отнял у него старшинство и не исполняет своих обязанностей относительно татар. Александр получил старшинство, и толпы татар... вторгнулись в землю Суздальскую. Андрей при этой вести сказал: «Что это, господи! Покуда нам между собою ссориться и наводить друг на друга татар; лучше мне бежать в чужую землю, чем дружить с татарами и служить им» [1, т.3, с.149–152].

Потом началась вражда Невского с его другим братом Ярославом, который княжил в Твери. Александр посадил вместо себя в Новгороде своего сына Василия, но горожане в 1255 г. выгнали его и призвали другого князя. Тогда Невский подступил с войском к Новгороду. После долгих скандальных переговоров ему удалось вновь усадить сына на княжеский стол.

Однако уже в 1257 г. Александр приводит в Новгород татарских послов с их требованием ясачной переписи всех дворов, а также десятины и тамги. Не согласились с этим новгородцы, оказался против даже Василий. Тогда Александр изгоняет сына из Новгорода. В 1259 г. в городе вспыхнул мятеж, татарские баскаки испугались и упрашивали Александра: Дай нам сторожей, а то убьют нас. Невский велел стеречь их по ночам. Когда послам все-таки удалось провести перепись населения, Александр уехал вслед за ними, оставив вместо себя на княжение в Новгороде другого сына, Димитрия. И все-таки весьма любопытно: удачливый полководец, победитель шведов и тевтонов — отчего ж он так оробел против Орды, сде-

лался ей таким послушным, враждовал даже с братьями и сыном?

В качестве еще одного примера отношений русских князей с Ордой выступает собиратель будущего Московского царства Иван Калита. Против прежнего для князей прибавилась теперь новая, важная и тяжкая обязанность — это поездки в Орду; Иоанн Калита ездил туда девять раз; сын его Симеон Гордый в кратковременное княжение свое был там пять раз. Иногда князья отправлялись в Орду и с женами и с детьми, иногда собиралось по нескольку князей и ехали туда вместе... иногда князья должны были отправляться с ханом в поход [1, т.4, с.487]. Но самым тяжким деянием Калиты в этом ряду стало безжалостное и кровавое сокрушение Твери с помощью татарского войска. Здесь в 1327 г. вспыхнуло восстание против ордынских злодейств. Великий хан Орды Узбек очень рассердился... послал за московским князем... Калита поехал сам в Орду тотчас после тверских происшествий и возвратился оттуда с 50 000 татарского войска. Присоединив к себе еще князя суздальского, Калита вошел в Тверскую волость по ханскому приказу; татары пожгли города и села, людей повели в плен и, просто сказать, положили пугу всю землю Русскую, по выражению летописца [1, т.3, с.224].

Разумеется, мы не станем здесь разбирать причины столь яростных многовековых борений русских князей друг с другом, а отнюдь не с теми, кто душил мрачным покрывалом своего владычества всю Русь. Даже победа на Куликовом поле не выправила в корне этой тяжелой картины. Проблема, как представляется, крылась в ином: понятие Руси в обществе уже имелось, но отсутствовало чувство единой родины. Оно тогда лишь зарождалось, и, судя по всему, в этих трудных процессах ведущую роль стала играть Русская православная церковь. В самом начале великого княжения Ивана Калиты в Москве сюда под самый конец своей жизни переместил постоянную кафедру митрополит Петр Киевский. Он уверял князя: Если послушаешь меня, сын мой, и воздвигнешь храм Пречистой Богородицы в сем городе, то и сам прославишься более других князей, и сыновья и внуки твои прославятся в роды, и город этот будет славен среди других городов русских. Враги его будут посрамлены... Митрополит оказался прав. А через 55 лет, в самый канун Куликовой сечи, наиболее почитаемый ныне среди российских святых Сергей Радонежский вооружил молитвой московского князя Дмитрия — будущего Донского: Следует тебе, господин, заботиться о порученном тебе Богом славном христианском стаде. Иди против безбожных, и, если Бог поможет тебе, ты победишь и невредимым в свое отечество с великой честью вернешься\*.

\* Житие Сергия Радонежского / Подготовка текста Д.М.Буланина // Библиотека литературы Древней Руси. Т.6: XIV — середина XV в. СПб., 1999.

## Куликово поле

С событиями начала сентября 1380 г. и также хрестоматийно известной победой Дмитрия Ивановича Донского над войском Мамая многие связывают начало освобождения от ига и возрождения Руси. По поводу Куликовской битвы были произнесены и звучат донные неисчислимы массы высокопарно-торжественных слов. Более того, роль этой битвы приравнивалась к вершинам мировой истории, ее причисляли к событиям, определяющим судьбы цивилизаций целых континентов. Вначале *Западная Европа была спасена от азиатцев [монголов], но восточная ее половина надолго еще осталась открытой для их нашествия; здесь с половины IX века образовалось государство, которое должно было служить оплотом для Европы против Азии; в XIII веке этот оплот был, по-видимому, разрушен; но основы европейского государства спаслись на отдаленном северо-востоке; благодаря сохранению этих основ государство в полтора столетия успело объединиться, окрепнуть — и Куликовская победа послужила доказательством этой крепости; она была знаком торжества Европы над Азией... она имеет... характер страшного, кровавого побоища, отчаянного столкновения Европы с Азией, долженствовавшего решить великий в истории вопрос — которой из этих частей света восторжествовать над другою?* [1, т.3, с.278].

Выдающегося российского историка Соловьева — с его словами вы только что познакомились — следует ценить и уважать за очень многое. Я же хочу обратить отдельное внимание на одну, также весьма примечательную и вызывающую глубокое уважение, особенность его творчества. Вот, например, ученый глубоко уверен в справедливости каких-либо собственных мыслей или заключений; он горячо и искренне воспекает столь значимые для него события. Однако почти тут же вы можете увидеть в словах историка то, что или протворечит его истовой увлеченности, или по меньшей мере заставляет существенно скорректировать высказанные им восторги и усомниться в их победном звучании. Это же относится и к фанфарам мировой славы относительно Куликовской битвы, где он продолжает: *Но Куликовская победа была из числа тех побед, которые близко граничат с тяжким поражением. Когда, говорит предание, великий князь велел счесть, сколько осталось в живых после битвы, то боярин Михайла Александрович донес ему, что осталось всего сорок тысяч человек, тогда как в битву вступило больше четырехсот тысяч. <...> Вот почему в украшенных сказаниях о Мамаевом побоище мы видим, что событие это, представляясь, с одной стороны, как великое торжество, с другой — представляется как событие плачевное, жалостное. <...> ...Говорит летописец... оскудела совершенно вся земля Русская воеводами, и слуга-*



Фигура Дмитрия Донского, попирающего татарского мурзу, на памятнике «Тысячелетие России» в кремле Великого Новгорода. Герой Куликовской битвы помещен здесь в ряд самых значимых персон российской истории.

*ми, и всяким воинством, и от этого был страх большой по всей земле Русской* [1, т.3, с.277–278].

*Страх большой по всей земле Русской* оказался вполне обоснованным. Потерпевший поражение Мамай отправился собирать новое войско, собрал его, но на его беду и на удачу Руси из-за Яика появился новый антигерой русской истории — хан Тохтамыш. И опять же на берегах Калки (какая привлекательная для битвы речонка!) Тохтамыш наголову разбил Мамай и воцарился в Орде. Незаметительно посылает он в Москву послов известить московские власти о переменах в ставке. *Князья приняли послов с честью и отправили своих послов в Орду с дарами для нового хана.* Правда, и сами ордынцы наполнились немалым страхом от Куликовского поражения.

Тохтамыш решил разогнать этот страх и в 1382 г. отправился с большим войском к Москве. Нижегородский князь в страшном испуге послал к хану двух своих сыновей, а рязанский — показал Тохтамышу, как удобнее всего подобраться к Москве. У победителя Мамайа Дмитрия Донского не было сил защищать Москву, и он отбыл в Переяславль и Кострому собирать полки. В Москве разгорелось сильное волнение. Многие желали бежать. Начались распри, разбой и грабеж. *Кто хотел бежать вон из города, тех не пу-*

скали, били и грабили. В число таких беглецов попал митрополит, великая княгиня и «большие» бояре. Татары сожгли город и осадили Кремль. После трехдневного штурма, уже хитростью, Тохтамыш врывается в это сердце Москвы и учиняет обычный для завоевателей полный погром с массовым истреблением ее обитателей. После московского поражения многие князья поспешили, как и в прежние годы, отправиться в ставку хана засвидетельствовать свою преданность ордынской власти...

Таким образом, основное значение Куликовской победы заключалось в зарождении у русских уверенности, что монголы могут быть побеждены, что не все так безнадежно. Тогда проявились очевидные признаки духовной свободы, забрезжили пока еще не вполне ясные проблески света в конце мрачной и долгой пещеры, начала колыхаться и распадаться доселе плотная и всепоглощающая тень ига.

## Золотая Орда слабеет

На исходе XIV в. силы Орды уже не походили на те, какими они были при Батые или же при его ближайших наследниках. Безусловно, и Куликовское поражение сыграло в этом свою роль. Однако намного более сильное воздействие имели три войны, проигранные Тохтамышем легендарному Тамерлану (Тимуру) в 1387, 1388 и 1395 г. Тохтамыш помнит, что в его жилах течет кровь Чингисхана, и кичится тем. Это подвигает его на нелепую веру в то, что именно он истинный властитель вселенной. Фигура выскочки Тамерлана раздражает его; он желает окоротить этого наглого (даже не султана!) простого эмира. Однако на том и завершилось Тохтамышево царство, а победитель Тимур отправился в неизвестные ему северные края. Захватив Елец, он спустился по Дону до Азовского моря, уничтожая христианские центры. Суровой зимой 1395/1396 гг. в самых низовьях Волги его воины штурмовали Хаджитархан (Астрахань). Затем Тамерлан, конечно же, не смог удержаться от того, чтобы подняться вдоль волжской долины на север и стереть с лица земли столицу Золотой Орды Сарай-Берке.

Но даже после всех ордынских несчастий невозможно было сказать, что степняки ослабели настолько, чтобы московиты могли не обращать на них внимания. В 1445 г. хан Улу-Махмет в одной из битв победил Василия II (Темного) — внука Дмитрия Донского — и захватил его в плен. За свободу великого князя пришлось заплатить великий окуп в 200 тыс. рублей. Из упоминавшихся поклонных поездок в Орду за ярлыками последняя датируется 1431–1432 гг., когда молодой и к тому времени еще не ослепленный коварным Шемякой Василий в споре со своим сановным дядей получил право на московское княжение.

Замечу, что к XV в. в жизни кочевых сообществ Степного пояса произошли заметные изменения. Еще в первой половине XIV в. новый великий хан Орды Узбек-хан, *храбрый герой, красавец наружностью, мусульманин, уничтоживший множество эмиров и волшебников*, которого недобрым словом поминают многие русские летописи, стал начинателем этой новой для ордынцев религии. От южных мусульманских центров последовали серии мощных импульсов, приведших к постепенной, но довольно быстрой исламизации степных народов. Особенно заметно отразилось это на судьбах зависимых от Тамерлана номадов Средней Азии. К 1440-м годам под властью клана Гиреев (Гираев) набирает силу и приобретает самостоятельность Крымское ханство. С 1478 г. ханы официально признают себя вассалами могучей Османской империи. На фоне мусульманского взлета христианизация почти не коснулась идеологических канонов степных тюркоязычных скотоводов.

## Стояние на Угре и конец ордынского ига

Ровно через 100 лет после кровавой, громкой, хотя и предельно тяжелой Куликовской победы Русь одержала над Ордой еще одну, в чем-то даже намного более важную победу. Правда, победу россияне добыли не в битве, но благодаря многомесячному *стоянию* на притоке Оки Угре. Близ этой речки в конце 1480 г. воинство московского князя Ивана III расположилось против отрядов ордынского хана Ахмата. *Стояние* это выглядело деянием скромным и отнюдь не героическим: ведь нападавшие на Русь татары ее уже сильно боялись, а защищавшиеся боялись нападавших. Очень показательно, что русский — и по номинации великий — князь трусил чрезвычайно. Он бросил свое войско и даже велел своему сыну и наследнику Ивану Ивановичу, оставленному во главе отрядов, покинуть позиции и отойти к Москве. Но тот отвечал: *Умру здесь, а к отцу не пойду*. Прилюдно срамил великого князя и архиепископ ростовский Вассиан, называя его бегуном: *Вся кровь христианская падет на тебя за то, что, выдавши христианство, бежишь прочь, бою с татарами не поставивши и не бившись с ними; зачем боишься смерти? Не бессмертный ты человек, смертный... дай мне, старику, войско в руки, увидишь, уклоню ли я лицо свое перед татарами!* [1, т.5, с.76].

В «Истории Российской» В.Н.Татищева финал *стояния* выглядит также весьма живописно: *Когда отступили сыновья русские от берега, тогда татары, страхом и жалостью о женах и детях своих одержимы, побежали; а наши думали, что татары за ними реку перешли и побежали на Кременец... Тогда дивно видеть было: одни от других бежали, и никто никого не преследовал* [6, с.436]. Но при всем том историки вполне справедливо сочли *стояние* на Угре победой русских.



За 100 минувших лет с года Куликовской битвы Московская Русь возмужала и окрепла, а некогда единая Золотая Орда былую мощь утратила. Во время *стояния* на Угре все это стало вполне очевидным. Правда, Иван III весьма страшился в одном сражении потерять все то, что Москва приобрела за последние полтора столетия; и Ахмат-хан справедливо опасался, что поражение его войска повлечет за собой печальные похороны Орды. Однако очень скоро похоронили и самого Ахмат-хана: ордынского главу собственноручно зарезал во сне его дальний соплеменник Ивак.

## О символике дат

Со времени *стояния* на Угре можно говорить и обычно говорят о финале *ига*, хотя дата 1480 г. в значительной степени символична: ведь от русских дань (именуемая, правда, подарками) к степным ханам поступала вплоть до начала царствования Петра I. Однако с тех пор окончательно завершились унижительные для русских князей процедуры вымаливания и выкупа ярлыков на княжение, и это было чрезвычайно существенно.

В истории почти непременно многие даты, которым придают или же стараются придать звучание некоего знакового абсолюта, при переходе культуры или блока культур из одного состояния в другое на самом деле таковыми не оказываются. Подобные кардинальные переходы вызревают, как правило, в периоде предшествующем, а признаки прошлого никогда не исчезают моментально. И проявляются эти признаки в том или ином виде в течение довольно долгого времени уже в новом периоде, после даты-символа. Именно это можно было наблюдать в долгой, тысячелетней истории сложных взаимодействий Руси с культурами Степного пояса.

Так, почти сразу после *стояния* на Угре Золотая Орда, этот столь ненавистный и властвовавший на протяжении 240 лет над Русью улус, как будто завершил свою историю. Но его сменило Крымское ханство (юрт), подвластное династии Гиреев, ставшей вскоре столь известной в России. Приведу послание Ивана III крымскому властителю Менгли-Гирею накануне *стояния* на Угре — с признаками неистребимого страха перед татаро-монгольскими владыками, хотя от Крымского ханства Москва как будто не зависела. Великий



Стояние на Угре. Миниатюра из летописного свода XVI в.

князь отрядил в Крым посла-боярина, и тот преподнес хану такую челобитную: *Князь великий Иван челом бьет: посол твой Ази-Баба говорил мне, что хочешь меня жаловать, в братстве, дружбе и любви держать... И я, слышав твое жалование и виде твое ярлык, послал к тебе бить челом боярина своего Никиту, чтоб ты пожаловал, как начал меня жаловать, так бы и до конца жаловал* [1, т.5, с.80]. Уже после падения Золотой Орды московский великий князь становится активным союзником Крымского ханства, и русские отряды участвуют в совместных набегах на врагов. Однако с некоторых пор (пожалуй, после 1500 г., в самом конце правления Ивана III) их отношения шаг за шагом становятся враждебными, и Крымский улус выходит на первый план борьбы с Москвой. ■

## Литература

1. Соловьев С.М. История России с древнейших времен. М., 1988–1995.
2. Седов В.В. Восточные славяне в VI–XIII вв. Археология СССР. М., 1982.
3. Бернштейн С.Б. Очерк сравнительной грамматики славянских языков. М., 1961.
4. Филин Ф.П. Образование языка восточных славян. М.; Л., 1962.
5. Слово о походе Игоре: Сборник / Прозаический перевод Н.А.Мещерского. Л., 1985.
6. Татищев В.Н. История Российская. Т.3. М., 1994.

# Король Кальцит

Апрельский фактчек

Р.К.Расцветаева

Углерод — один из наиболее распространенных на Земле химических элементов. Да и в космосе он на четвертом месте (после Н, Не и О). В соединениях бывает то катионом, то анионом, то нейтральным атомом. Его заряд меняется: 0, +2, -2, +4 и -4. Наряду с водородом, азотом и кислородом углерод составляет основу органической жизни. Кристаллизуется он в нескольких модификациях: в виде алмаза, лонсдейлита, графита, карбинов, фуллеренов. Алмаз и графит распространены в глубоких слоях Земли (мантии), а лонсдейлит (вместе с алмазом) установлен даже в метеоритах. Большая часть углерода входит в осадочные породы в виде карбонатов, хотя последние могут быть и магматического (например, на вулканах Керимаси и Ол-Доиньо-Ленгаи), и гидротермального (в основном кальциты) происхождения. Карбонатные минералы широко распространены в земной коре (более 300 минеральных видов). Их нашли и на Марсе (с помощью американского космического аппарата Curiosity). В структуре карбонатов углерод находится в треугольниках из атомов кислорода, которые не способны к поликонденсации. И все структурные особенности карбонатов основаны на взаимодействии катионных полиэдров с  $(\text{CO}_3)^{2-}$ -треугольниками.

## Пролог

Карбонатный народ не случайно избрал своим королем **Кальцита**. Он широко известен на Земле и получил свое название от латинского *calx*, что переводится как «известь». Кальцит всем хо-



**Рамиза Кераровна Расцветаева**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН. Основные работы посвящены проблемам структурной минералогии. Совместно с другими исследователями ею открыто более 50 новых минералов. Она лауреат шести премий Российского фонда фундаментальных исследований за лучшую научно-популярную статью. Рамиза Кераровна придумала особый жанр — минералогическую сказку. Начиная с 2001 г. мы постоянно публикуем эти необыкновенные сказки в «Природе». Кроме того, Рамиза Кераровна написала ряд научно-популярных статей о тонкостях структурного анализа. На протяжении долгих лет она рассказывала нашим читателям, как открывают минералы и с какими трудностями сталкиваются исследователи при утверждении новых минеральных видов, как их устанавливают и дискредитируют. В честь Рамизы Кераровны назван один из минералов группы эвдиалита — расцветаевит.

**В апреле Рамизе Кераровне исполнилось 80 лет. Редакция поздравляет юбиляра, желает здоровья, благополучия и творческих удач в ее нелегком и благородном труде — популяризации современной науки.**

рош: прозрачен, как слеза, форма его кристаллов — одна другой лучше (розочки, лепестки, глобулы, столбики, пластинки и многое другое). И в области двупреломления света нет ему равных. Кальцит устойчив к изменениям условий, хотя под давлением превращается в мрамор (но это же под давлением!). Но когда он постарел и ослаб, то решил добровольно отречься от престола. Обычно короли пожизненно остаются королями, и только после смерти трон переходит к другому: «Король умер. Да здравствует Король!». Однако Кальцит не захотел дожидаться собственной кончины и объявил о досрочном уходе. В истории случались прецеденты такого рода. Вот совсем недавно испанский король Хуан Карлос I объявил о своей отставке и рекомендовал в качестве преемника своего сына.

У кальцита, безусловно, есть родственники. Но кому из них передать трон? У всех есть достоинства, но и недостатков хватает. Главная же проблема у всех одна — маленький размер  $\text{CO}_3$ -треугольников. Конечно, они сопоставимы с борными треугольниками\*, но у бора есть выбор — более просторные тетраэдры, а углероду деваться некуда. И еще карбонатные треугольники не могут объединяться друг с другом (впрочем, как и сульфатные тетраэдры). Однако они не «хикикомория»\*\*. Хотя и держатся особняком, но всегда на виду. Треугольники же открыты с двух сторон.

### Серия первая

Король Кальцит живет во дворце, где неукоснительно соблюдается идеальный порядок. Са-октаэдры выстроены ровными рядами, а равносторонние треугольники расположены поэтажно параллельно друг другу и перпендикулярно оси *c*. Этажи накладываются друг на друга так, что октаэдры соединяются вершинами с октаэдрами соседних этажей.

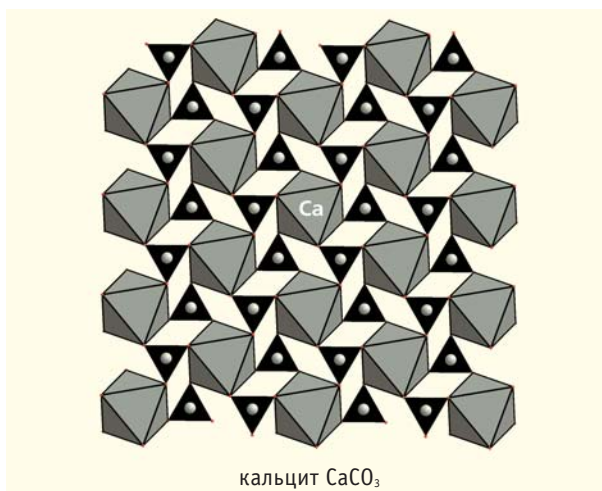
Типовые постройки родни не отличаются от кальцитового дворца. Но кто в них хозяйничает? Одни родственники магниевые (**магнезит**  $\text{MgCO}_3$ ), другие — железные (**сидерит**  $\text{FeCO}_3$ ). Марганцевый розовый **родохрозит**  $\text{MnCO}_3$  из штата Колорадо — красавец, ничего не скажешь. Недаром его название происходит от двух греческих слов *родо* и *хроми́с* — «роза» и «окраска».

Есть и другие, более экзотические родственники — кадмиевый **отавит**  $\text{CdCO}_3$ , никелевый **гаспеит**  $\text{NiCO}_3$  (названный по месту находки на п-ове Гаспе в Канаде), кобальтовый **сферокобальтит**  $\text{CoCO}_3$  (тоже розово-красный, но на воздухе быстро обесцвечивается) и цинковый **смитсонит**  $\text{ZnCO}_3$ . Последний особенно близок к кальциту. Белые кривые кристаллы (почковидные и радиально-лучистые) смитсонита часто даже образуются за счет кальцита. Цинковые октаэдры меньше по размеру, чем кальциевые, и идеально сочетаются с треугольниками. А назван минерал в честь английского химика и минералога Дж.Смитсона, на средства которого создан Смитсоновский институт в Вашингтоне.

Однако никому из родни нельзя доверить королевство, в котором большинство населения кальциевое, а остальной народ составляют нацменьшинства. Конечно, есть два чистокровных родственника — брат **арAGONIT** и отец **ФАТЕРИТ** (оба  $\text{CaCO}_3$ ). Старик, названный в честь немецкого минералога и химика Г.Фатера, еще крепок, хотя и уступает по стабильности кальциту и арагониту.

\* См.: *Расцветова Р.К.* Великаны в стране пигмеев // Российская наука: истина в ином приближении. М., 2005. С.249–258.

\*\* См.: *Расцветова Р.К.* Хикикомория // Природа. 2014. №4. С.68–80.



Но, к сожалению, фатерит придерживается устаревших традиций, считая, что его ориентация  $\text{CO}_3$ -треугольников вдоль оси *c* лучше, чем у кальцита. Хотя он и живет во дворце, похожем на кальцитовый, но в нем нарушен основной принцип королевства. Там, видите ли, *демократия*, и треугольникам разрешено смотреть в разные стороны. А ведь свобода до добра не доведет. Так недалеко и до анархии. И вот результат: Са-октаэдры исказились до неузнаваемости, а остальные, хуже того, стали семивершинниками и даже восьмивершинниками. И все соединяются, кому как вздумается, — то ребрами, то вершинами.

Арагонит тоже хорош. Братья живут дружно и нередко переслаиваются (особенно в сталактитах). Но, чтобы отличаться, арагонит поместил Са в девятивершинники, которые соединил ребрами в ступенчатые стенки. Те же, наклонившись друг к другу, объединились вершинами крупных полиэдров при участии мелких треугольников. И чего добился? Конечно, он немного повысил и плотность, и твердость, но стал нестабилен. А стабильность — важное качество монарха. И уж очень арагонит экстравагантен. Хотя по происхождению он испанец из провинции Арагона, в Марокко маскируется под таблички, а в Трансваале рядится в шапку тонких иголок. То подружится с моллюсками, то поселится в скелете какого-нибудь животного, то зароется в осадках горячих источников в Карловых Варах. Пробует себя

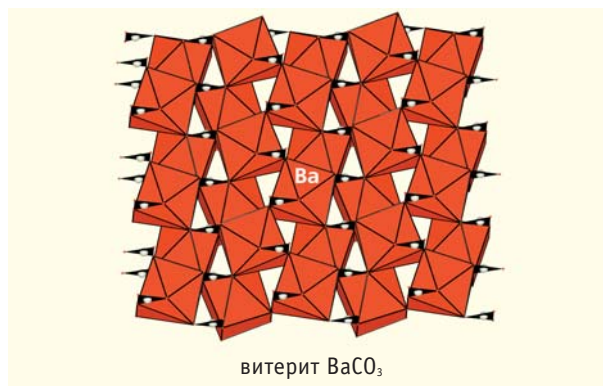
и в бизнесе в качестве поделочного камня (правда, дешевого, арагонитовым ониксом называется).

Еще один родственничек, **моногидрокальцит**  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , раньше назывался просто гидрокальцитом. Но это не меняет сути дела. Бывает он и биохимического происхождения — из разложившихся кактусов или помета животных. И хотя он всюду соседствует с кальцитом и арагонитом, ни с тем, ни с другим у него нет ничего общего. Са он поместил не в октаэдры и не в девятивершинники, а в восьмивершинники, которые соединились ребрами в спирально закрученную колонну, обвешанную треугольниками и молекулами воды. Треугольники ребром прислонились к одному восьмивершиннику, а вершиной к другому. Колонны соединяются через торчащие наружу вершины треугольников.

Моногидрокальцит получается и из **икаита**  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , в котором воды в шесть раз больше. Икаит назван по месту находки во фьорде Ика (Гренландия), но его видели также и в шельфе Антарктики, и в арктических морях. Он нахватал столько воды, что она заняла все вершины восьмивершинников Са, а для треугольников оставила только одно ребро. Изолированные восьмивершинники сложены в стопки, связь между которыми ненадежная — водородная. И неудивительно, что икаит неустойчив и при комнатной температуре быстро переходит в моногидрокальцит. Его держат в холоде, при температуре ниже нуля. И поделом ему, не надо было жадничать.

Но главное — фатерит, арагонит и моногидрокальцит сохранили кальций. А вот **стронцианит**  $\text{SrCO}_3$  отказался от него, заменив стронцием. Тем и прославился. Назвали этот минерал по месту находки близ г.Стронциана в Западной Шотландии, а уже позже он дал свое имя элементу стронцию. Такое случается не часто, обычно минерал называют по его составу, а не наоборот. Стронцианит стал визитной карточкой некоторых пород в массиве Канганкунде в Восточной Африке. Ему есть чем гордиться: он и флуоресцирует, и фосфоресцирует, и термолюминесцирует, и концентрирует с целестином ( $\text{SrSO}_4$ ) по запасам стронция. Сам стронцианит бесцветный и прозрачный, но пламя окрашивает в ярко-красный цвет. Для того чтобы его опознали, ему надо сгореть. А это очень несправедливо.

Но всех превзошел **витерит** — форменный хамелеон. Его снежно-белые и прозрачные кристаллы бывают плоскими и чечевицеобразными, а агрегаты — шаровидными, почковидными, столбчатыми и шестоватыми. Назван он в честь открывшего его У.Уитеринга — английского физика, ботаника и минералога (хотя таких людей называют не хамелеонами, а универсалами). У витерита самая высокая плотность. Дружит он с кальцитом, но остается преданным бариту, являясь его прямым наследником (витерит — продукт изменения барита в гидротермальных условиях). Главное же



его сокровище — барий, который добывают из него в Северной Англии.

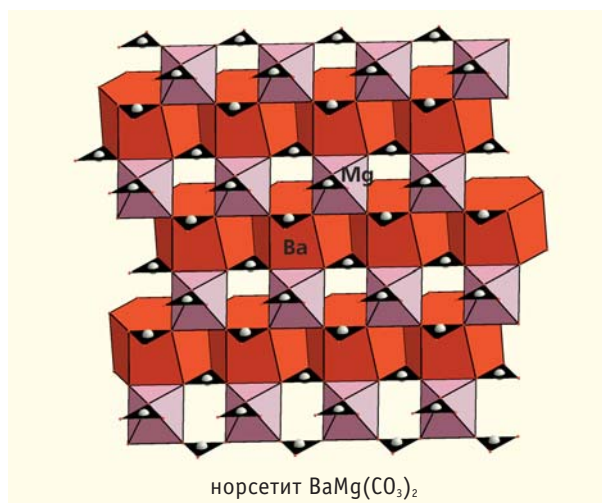
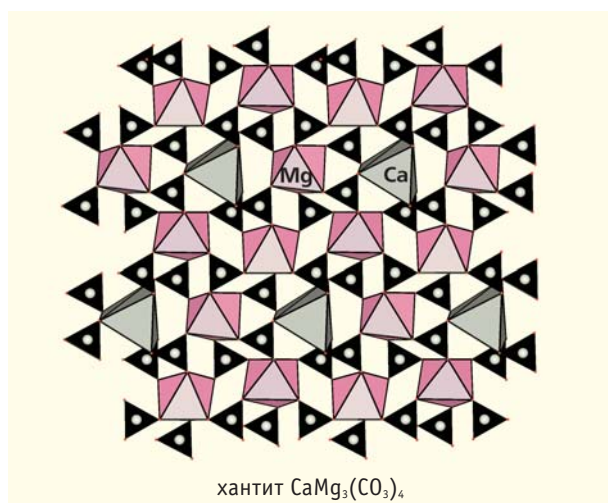
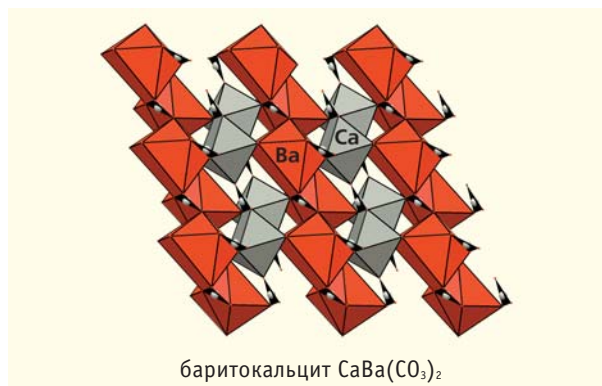
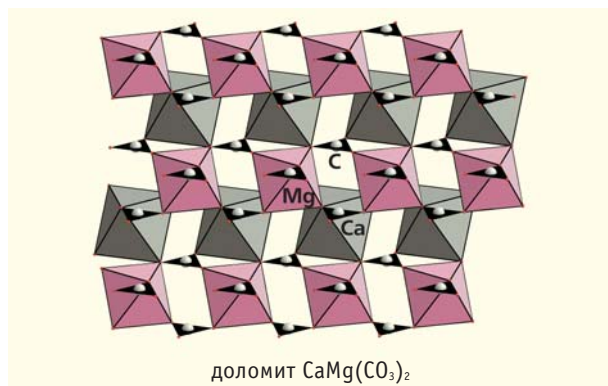
**Церуссит**  $\text{PbCO}_3$  (от латинского *cerussa*, что означает «белила») — один из наиболее устойчивых карбонатов. Ему нипочем жаркий климат Австралии, Конго, Намибии.

Ромбические постройки стронцианита, витерита, арагонита и церуссита одинаковы. В них крупные девятивершинники соединяются ребрами в ступенчатые стенки, которые объединяются либо вершинами, либо ребрами, а маленькие треугольники зажаты с трех сторон. Каждый девятивершинник буквально облеплен шестью треугольниками. Им приходится не только уживаться с крупным соседом, но и поочередно менять свою ориентацию на противоположную, чтобы не мешать друг другу.

## Серия вторая

Демократия еще полбеда, а вот рыночные отношения довели до того, что стали торговать самым дорогим, что есть у кальциевого народа — кальцием. Половину помещений сдали кому угодно, лишь бы платили. Пример показал сам **доломит** — один из главных породообразующих минералов осадочных пород высыхающих озер и заливов, ближайший родственник кальцита по архитектуре. Их часто видят вместе: то кальцит эпитактически нарастает на доломите, то доломит на кальците.

Если у кальцита и его группы поддержки (магнезита, сидерита, родохрозита) треугольники расположены параллельно друг другу, соединяя этажи из однотипных октаэдров, то в доломитах треугольники сцепляют этажи двух типов — кальциевые и магниевые. Доломит назван в честь открывшего его французского геолога и химика XVIII в. Деода де Доломье. Однако этот минерал как только не называли — кодацитом, миemitом, мурикальцитом, ридольфитом, перлшпатом, пикритом, тарандитом, бросситом, раукальком, раутеншпатом и даже известняком горьким, известью кремнистой, кальцитом дымчатым, магнезиокальцитом, шпатом доломитовым и шпатом кальциево-талковым.



Сам доломит бесцветный или белый, но в зависимости от добавок становится розовым — (Mn) **грейнерит**, ржавым — (Fe) **броссит**, зеленым — (Ni) **тараспит** и даже черным — **теруелит**.

**Кутнагорит**  $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$  (из рудника Кутна-Гора, Чехия) и паракутнагорит имеют такое же строение, как и доломит, только магния заменил марганец. **Хантит** пожадничал и сдал магнию в аренду в три раза больше помещений, чем доломит. При этом Ca переселился из октаэдра в тригональную призму. Но и это еще не все, он вообще лишился собственного этажа и перебрался к Mg. Этажи вздыбились и стали волнистыми. Но, как говорят нынче, ничего личного, просто бизнес.

А в **баритокальците** половина помещений отдана барию. Он в крупных девятивершинниках, соединяясь ребрами, построил ступенчатые стенки, а мелкие Ca-октаэдры, также скрепившись ребрами, образовали двоянные колонки. Через треугольные мостики эти колонки объединились в дырявые ступенчатые кальциевые стенки, а вершинами октаэдров соединились с бариевыми.

Дело дошло до того, что в названном в честь геолога К.Норсета **норсетите** из штата Вайоминг (США) бедного Ca вообще изгнали и заменили на Ba. И не слишком утешает, что при этом норсетит сохранил близость и к кальциту, и к доломиту. Огромные двенадцативершинники бария в виде шес-

тигранных призм соединились ребрами друг с другом как вдоль, так и поперек, в гладкую стенку, а изолированные миниатюрные октаэдры оказались зажатые между стенками. А каково треугольникам? Те, что в бариевой стенке, с трех сторон зажаты призмами бария. Другие живут просторнее — между стенками — и объединяют свои вершинами по три магниевых октаэдра.

А **бенстонит** решил пригласить всех сразу: кальция, бария и магния. Его не смутило, что они разных размеров. Стенки из чередующихся разнокалиберных кирпичей (крупных двенадцатиугольных призм бария, более мелких октаэдров



кальция, миниатюрных октаэдров магния и совсем мелких треугольников углерода) получились неровными. И все строение покорежилось.

Жадность, как известно, до добра не доводит. Из-за различного состава этажей возникают натяжения, искривляющие кристаллы и придающие им седловидную форму, как в **анкерите**  $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$  из месторождения Браун-Хилл (Англия), или даже сферолитовую, как в бенстоните.

### Серия третья

Поскольку на всех цемента не напасешься, строить стали из чего попало. Особенно популярным стал дешевый одновалентный материал.

Всем известно, что сода бывает пищевая, питьевая, двууглекислая, каустическая, кальцинированная и др., и все привыкли, что это белый порошок, добавляемый в пищу или используемый в медицине, быту или промышленности. Но мало кто знает, что сода — минерал со снежно-белыми хрупкими ограненными кристаллами со стеклянным блеском, неустойчивыми на воздухе и легко растворимыми в воде. Более того, сода не единственный минерал, а целое семейство: сода, трона, натрит, нахколит и ряд сопутствующих. Все они натриевые карбонаты, но различаются количеством Na,  $\text{CO}_3$  и молекул воды и, конечно же, внутренним устройством.

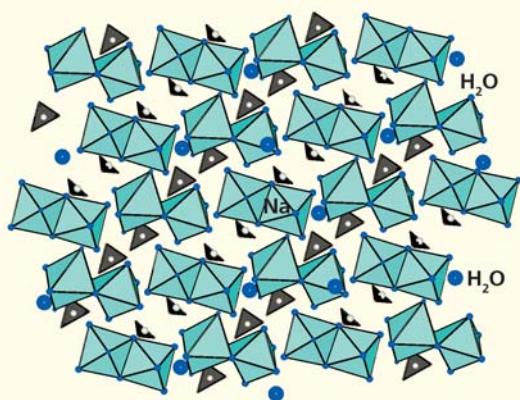
**Сода** широко распространена, особенно в странах с сухим и жарким климатом. Она образует белые сугробы на берегах высыхающих содовых озер, горячих источников и в вулканических возгонах. Имя ее арабское и связано с морским растением *Salsola soda* — солянкой. Используется также и устаревшее название «натрон». Она наиболее водный из содовых минералов. Октаэдры натрия ребрами соединяются в изолированные и развернутые друг относительно друга парочки. Все вершины октаэдров заняты молекулами воды, и для треугольников не остается никаких шансов присоединиться к ним. Кроме воды, приватизированной натрием, вокруг много и свободных ее молекул,

что еще больше изолирует треугольники, которые держатся на тонких ниточках водородных связей. Но они не унывают. Зато можно поворачиваться в разные стороны и весело кувыркаться на свободе. А когда наступают трудные времена и все кругом пересыхает, треугольники оказываются перед выбором — либо идти в услужение к натриям, либо оставаться свободными, но никому не нужными.

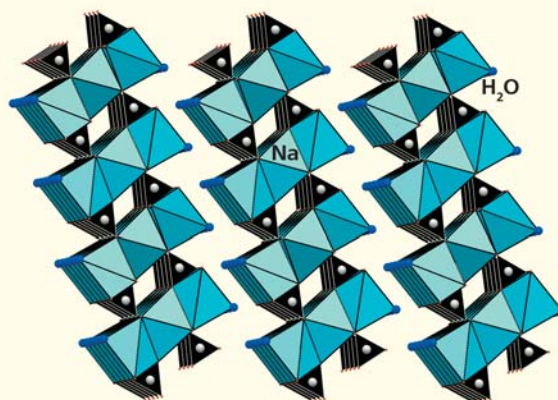
**Термонарит**  $\text{Na}_2(\text{CO}_3)\cdot\text{H}_2\text{O}$  получается из соды при ее нагревании. Его название в переводе с греческого означает «тепло + сода». Эта сода встречается в пустынях всего мира, вулканических фумаролах (например, на Везувии), соляных озерах щелочного массива Илимауссак в Гренландии. Ее находят во многих частях мира. И даже в Антарктике!

**Трона** унаследовала арабское название «натрун» — «природная соль». Добывается трона из оз.Сёрлс (в пустыне Мохаве в Калифорнии). Другое ее имя — египетская соль. Кристаллы троны бесцветные или бледно-желтые, хорошо растворяются в воде. Она может гордиться своими промышленными залежами, как в одном из озер Танзании, которое так и называется — Натрон. У него много определений, и одно ужаснее другого — мертвое, зловещее, жуткое, смертельно красивое... Температура воды  $60^\circ\text{C}$ , а щелочность достигает  $\text{pH} = 10.5$ . Выживают там только цианобактерии, окрашивающие озеро в красный цвет, и экстремальная рыбка телалипия. Для остальных, опустившихся на поверхность воды, оно — смертельная ловушка. А когда животное погибает, то отвердевает и сохраняется в виде статуи. Знаменитый фотограф Ник Брандт, путешествовавший по Танзании, сделал много фотографий таких окаменевших птиц и летучих мышей, чем и прославился на весь мир.

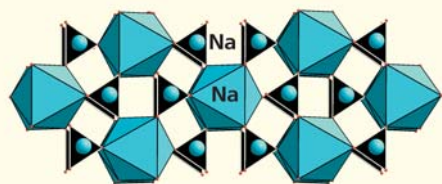
Трона сэкономила воду (на один Na приходится меньше одной молекулы), объединив натриевые октаэдры ребрами в тройные колонны, которые друг с другом скреплены треугольниками: ребро соединяется с одной колонной, а вершина — с другой. Свободные вершины крайних октаэдров заняты водой. Шеренги колонн удерживаются вместе лишь водородными связями.



сода  $\text{Na}_2(\text{CO}_3)\cdot 10\text{H}_2\text{O}$



трона  $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

натрит  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 

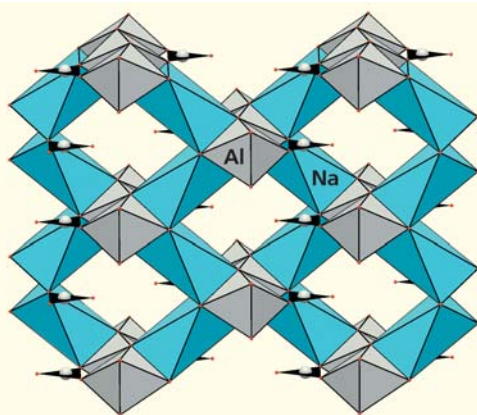
Злоупотребление водой одновалентными строителями делает их постройки непрочными. И неудивительно, что некоторые предпочитают безводные строения.

Кальцинированная сода **натрит** образует прозрачные бесцветные или слабо окрашенные в розовый цвет кристаллы. Безводный натрит построен из натриевых октаэдров, к вершинам которых подвешены треугольники. Октаэдры гранями объединяются в колонки, расположенные в шахматном порядке и соединенные треугольными мостиками. Каждый мостик цепляет своими вершинами три колонки, а над (и под) треугольниками располагаются остальные атомы натрия, упакованные в крупные девятивершинники.

**Нахколит**  $\text{NaHCO}_3$  тоже безводный. Его Na-октаэдры объединяются ребрами в парочки, которые так же, ребрами, соединяются в вдвоенные колонны. Выстроенные в шахматном порядке колонны связаны треугольными мостиками.

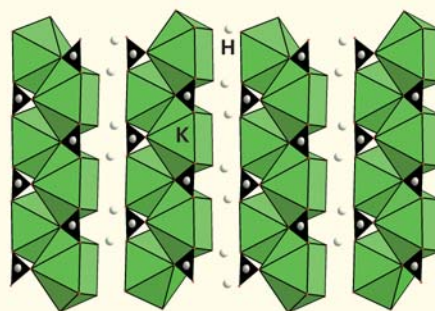
**Баренцит**  $\text{Na}_7\text{AlH}_2(\text{CO}_3)_4\text{F}_4$ , прибывший с Кольского п-ова, подружился с алюминием. Он хоть и маленький, но высокосвязанный и энергичный и вполне может укрепить любое сооружение. Стенки из чередующихся октаэдров Na и Al, соединенных ребрами друг с другом, сшиваются вдвоенными колонками из Na-октаэдров, а треугольники всеми своими вершинами укрепляют связь колонок и друг с другом, и со стенками.

Куда более крепкую постройку соорудил **давсонит**, убравший лишний натрий. Октаэдры алюминия он объединил ребрами в колонны, дополнительно укрепленные треугольниками. Колонны выстроил в шахматном порядке и каждую соеди-

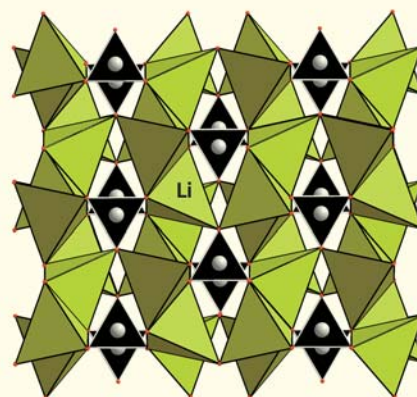
давсонит  $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ 

нил с четырьмя другими одиночными октаэдрами натрия. Давсонит — уроженец Канады и назван в честь канадского геолога Дж.У.Доусона. Хотя его встречают и в Италии, и даже в Боливии, он гордится тем, что служит сырьем для получения соды и глинозема в США.

**Вегшайдерит**  $\text{Na}_5\text{H}_3(\text{CO}_3)_4$  и **тешемахерит**  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  взяли за основу проект нахколита, но тешемахерит пошел дальше и заменил натрий аммонием. Теперь его треугольники живут в водородных облаках. **Калицинит**, названный по составу, также использовал водороды для объединения своих громоздких стенок из восьмивершинников калия.

калицинит  $\text{K}(\text{HCO}_3)$ 

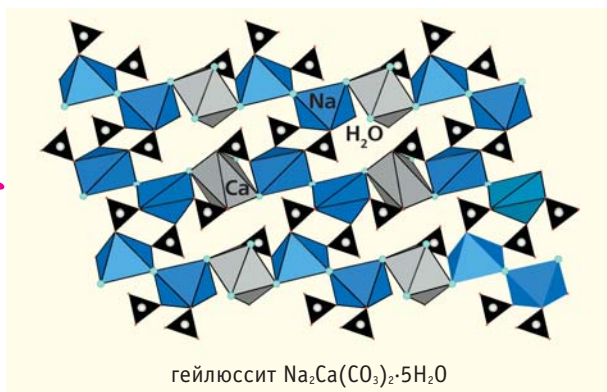
Идея объединять что-либо с помощью водородов оказалась плохой, ведь они такие маленькие и слабосильные. Вот **забюейлит** и решил обойтись без них и молекул воды, а заодно и без натрия и калия. Да и где их взять в этом высокогорном сверхсоленом содовом озере Забуе, что в китайском Тибете? Зато лития там хоть отбавляй. Его тетраэдры сцепились друг с другом как попало. Зеленая молодежь, требуя смены власти, устроила настоящий «майдан». Чтобы усмирить буйных молодчиков, пришлось призвать стражей порядка, которые, прикрываясь треугольными щитами, сдерживали разъяренную толпу. Конечно, забюейлиту скучать не приходится, но зато он может гордиться тем, что он главный по запасам лития в Китае.

забюейлит  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 

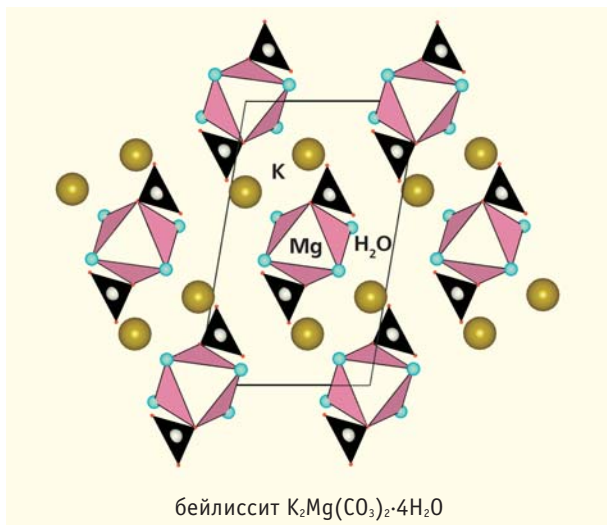
Древнейший фракциментарий

## Серия четвертая

Как бы ни были искусны низковалентные строители Li, Na и K, их сооружения, хотя порой и радуют глаз, имеют существенный недостаток — они недолговечны и часто рассыпаются на воздухе, не говоря уж о воде. Для укрепления своей постройки **гейлюссит** пригласил в помощь натрию кальция — известного потомственного строителя. Правда, у натрия оставалось численное преимущество, и он построил два полуоктаэдра, а кальций — только один октаэдр. Полиэдры сцепились друг с другом вершинами в волнообразные цепочки, соединенные с соседними треугольными мостиками. Вода заполнила свободные вершины натриевых и кальциевых полиэдров, дополнительно сцепляя цепочки водородными связями.

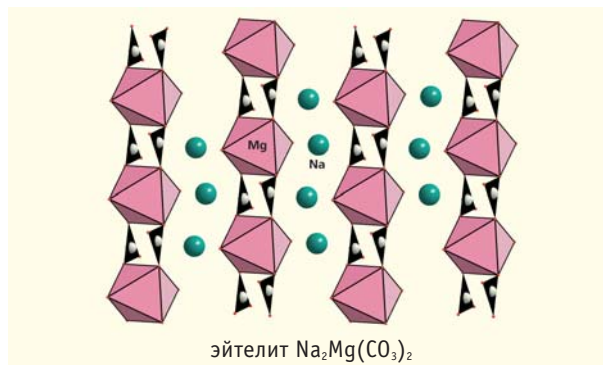


**Бейлиссит**, чтобы его не спутали с гейлюсситом, поменял все, что мог: кальций на магний, натрий на калий и пять молекул воды на четыре. Хотя он найден в Швейцарии, назвали его в честь австралийского химика Н.С.Бейлисса, получившего его синтетический аналог. Mg-октаэдры оказались в изоляции, окруженные четырьмя молекулами воды, и только к двум вершинам прикрепились треугольники. Между этими тримерами распо-

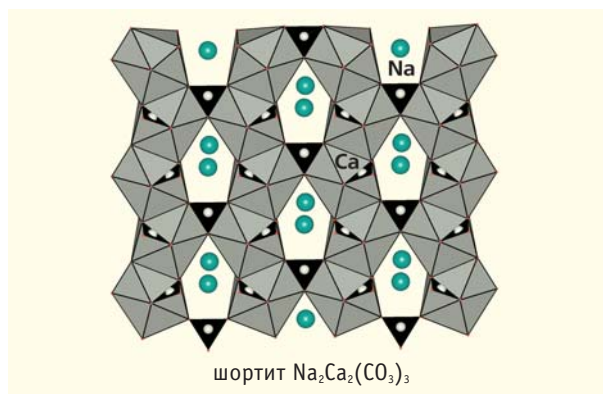


жились атомы калия, ребрами объединив свои крупные полиэдры в парочки.

**Пирссонит**  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , как и гейлюссит, укрепил свою постройку с помощью кальциевого цемента, но это не убергло ее от высыхания. С уходом воды оба перестроились в **ниеререйт**  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ , который назвали в честь президента Танзании Ю.К.Ньерере (в прошлом простого учителя). Ниеререйт, как и его калиевые друзья **файрчильдит**  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  и **бючлиит**  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ , взял за основу простенькое строение **эйтелита** из изолированных октаэдров магния, соединенных треугольными мостиками в дырявые стенки, с девятивершинниками натрия между ними.



**Шортит** не поспешил на цемент и увеличил количество Ca. Кальции дружно взялись за дело и объединились ребрами в колонны, а вершины — в стенки. Стенки же соединились вершинами в постройку, которую дополнительно укрепили треугольниками. Ну а натрий разместился в окнах.

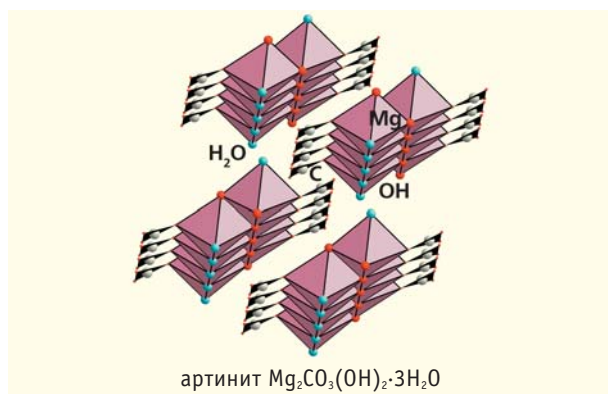


**Лансфордит**  $\text{Mg}(\text{CO}_3) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , названный по месту находки близ г.Лансфорда (штат Пенсильвания, США), решил вообще отказаться от одновалентных гастарбайтеров. Какой от них толк, только путаются под ногами. Лучше иметь дело с надежными партнерами. Лансфордит припас и воду (пять молекул на каждый магний). Однако ее хватило на вершины лишь половины октаэдров. У других же октаэдров четыре водные вершины, а к двум свободным пришлось прикрепить треугольные весла, которыми можно грести в водных просторах.

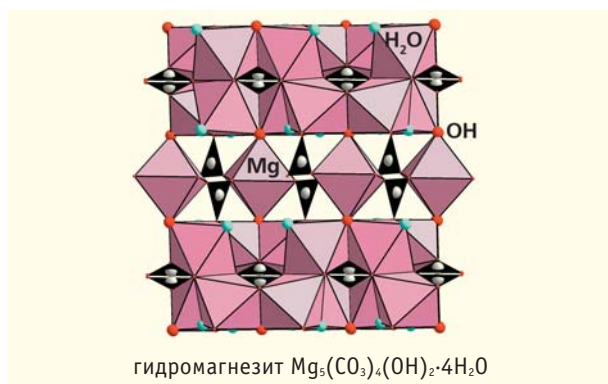


**Несквегонит**  $MgCO_3(OH)_2 \cdot 3H_2O$ , названный по месту находки в коях Несквегонинг (США), уменьшил количество воды, и, как результат, октаэдры Mg сцепились вершинами в зигзагообразные цепочки. Треугольники ребром и вершинами прикрепились к звеньям цепочек и цементировали их в колонны, в которых свободные вершины заняли молекулы воды. Колонны объединились водородными связями своих молекул и тех, что между ними.

**Артинит** прибыл из округа Сан-Бенито (что в Калифорнии) в виде пучков блестящих иголок. Такие же иголки треугольников торчат из боков его магниевых октаэдров. Хотя артинит обошелся еще меньшим количеством воды, ее хватило и на свободные вершины магниевых октаэдров, и на гидроксильные ребра, по которым октаэдры соединяются попарно в двоянные колонны.

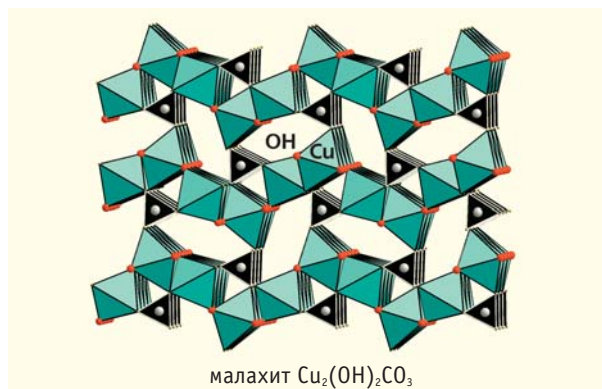


**Гидромагнезит** явился в виде бесцветных пластинчатых кристаллов прямо из штата Невада. Он задумал построить резиденцию, непохожую на обыкновенную кальцитовую резиденцию магнезита. Пришлось использовать ребра и вершины магниевых октаэдров для объединения их в гофрированную двухэтажную стенку, а на втором этаже оставить изолированные октаэдры. Монументальное здание на сваях укреплено взаимно перпендикулярными треугольниками: горизонтальные инкрустируют двухэтажную стенку, а вертикальные соединяют одиночные октаэдры друг с другом и со стенкой.



## Серия пятая

«Федерация голубых»\* пополнилась карбонатными представителями, когда ее члены, медьсодержащие органические минералы пацеит и хоганит, познакомились со своими соседями по месторождению Брокен-Хилл в Австралии — **малахитом и азури-том**. Пацеит и хоганит были слышаны об этих знаменитостях и охотно согласились дать им рекомендации для вступления в Федерацию, хотя малахит скорее зеленого, нежели голубого цвета.



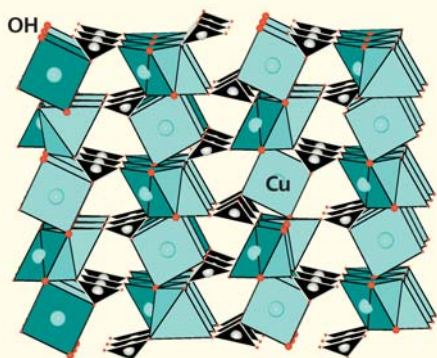
И действительно, кто же не знает этот красивый поделочный камень? Конечно, все слышали про малахитовую шкатулку, а некоторые видели отделанные им колонны Исаакиевского собора или бывали в Малахитовом зале Зимнего дворца в Санкт-Петербурге. И конечно же, все знают, что изделия из уральского малахита прославили дореволюционную Россию. Кроме того, он представляет ценность и как руда на медь. Малахит — основной карбонат меди. Он широко распространен на Урале, в Казахстане и кое-где в Европе. Но особенно много его в Конго.

А вот что такое минерал малахит и как он устроен внутри, мало кто задумывался. Его внутреннее строение также восхищает своим изяществом. Медь находится в октаэдрах из атомов кислорода и гидроксильных групп. Кислородные и гидроксилсодержащие октаэдры объединяются ребрами в двоянные колонки, которые вершинами октаэдров соединяются в гофрированную стенку. А треугольники встраиваются в изломы стенки и соединяют кислородными вершинами соседние стенки.

Свое название из-за травянисто-зеленого цвета и шелковистого или бархатистого блеска малахит получил от греческого *μολοχα* — «мальва». Однако стоит ему нагреться до 590 К, как он сразу теряет воду и  $CO_2$  и переходит в черный **тенорит**  $CuO$ .

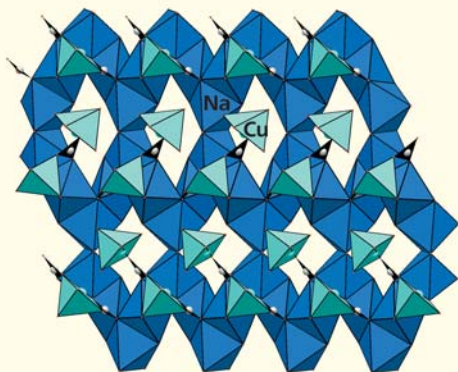
Но если в малахите половину медных октаэдров заменить на цинковые, то получится **розазит**, названный по месту находки на руднике Розаз в горах Сульчис на о.Сардиния.

\* См.: *Расцветова Р.К.* Гуановая республика // Природа. 2015. №4. С.75–87.

азурит  $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ 

Близкий родственник малахита **азурит** распространён меньше — и в основном в сухих районах. Он образует кристаллы с изогнутыми гранями, радиально-лучистые и землистые агрегаты, конкреции. Его имя происходит от арабского «азул», что переводится как «небо» или «лазурь», а по звучанию напоминает сразу два минерала — лазурит и лазулит. Второе название азурита — «медная синь». Его используют в качестве синей краски. При увеличении влажности азурит переходит в малахит, а в сухие периоды может снова стать азуритом. Хорошо устроился! Но как ему удастся перестраивать свою структуру? Она ведь совсем не похожа на малахитовую. Один атом меди находится в квадрате, а ещё два — в тетрагональной пирамиде. Пирамиды поочередно развернуты друг относительно друга и по ребру соединяются в кривоватые цепочки, а квадраты связывают их двумя вершинами в стенки с крупными четырехугольными петлями. Треугольники служат мостиками между квадратами и пирамидами, а третьей вершиной дотягиваются до соседних стенок, объединяя их в ажурную постройку.

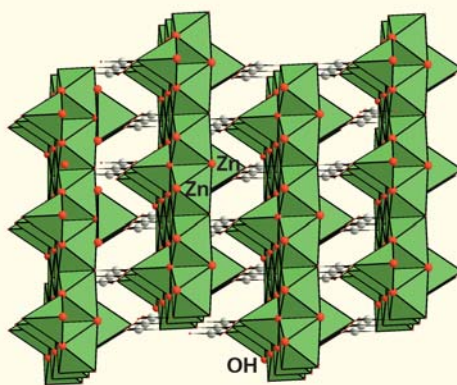
**Хальконатронит**, названный по составу (медь + натрий), задумал построить резиденцию в виде арок, чтобы она выглядела нарядно и торжественно. Он привлек к строительству натрия в два раза больше, чем меди. Октаэдры натрия, объединенные ребрами и гранями, образуют по-

хальконатронит  $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 

лукруглые арки, между которыми крепятся фонарики из медных полуоктаэдров, соединенных попарно треугольным мостиком. Конструкция получилась на редкость оригинальной и вместе с тем достаточно прочной.

Еще один член Федерации — **аурихальцит**  $(\text{Cu,Zn})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$  из штата Аризона. Его имя в переводе с греческого означает «горная медь», а с латинского — «золото». Однако минерал не содержит никакого золота и даже не обладает золотистым цветом, его пластинчатые кристаллы — светло-голубые, зеленые и синие. И хотя он считается карбонатом меди и цинка, последнего в нем мало, и он лишь подмешивается к меди в пятивершинниках и тетраэдрах. Идея строения аурихальцита проста: медные октаэдры по ребру соединяются в стенки, к которым с двух сторон примыкают пятивершинники и тетраэдры. Стенки попарно объединяются треугольными мостиками.

А вот **гидроцинкит** не входит в Федерацию, так как заменил всю медь цинком, а пятивершинники —

гидроцинкит  $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ 

тетраэдрами. Однако он сохранил основную архитектурную идею аурихальцита. К стенкам из цинковых октаэдров с двух сторон присоединяются цинковые же тетраэдры, которые треугольными мостиками соединяются с соседними стенками в постройку, укрепленную Н-связями ОН-групп.

## Серия шестая

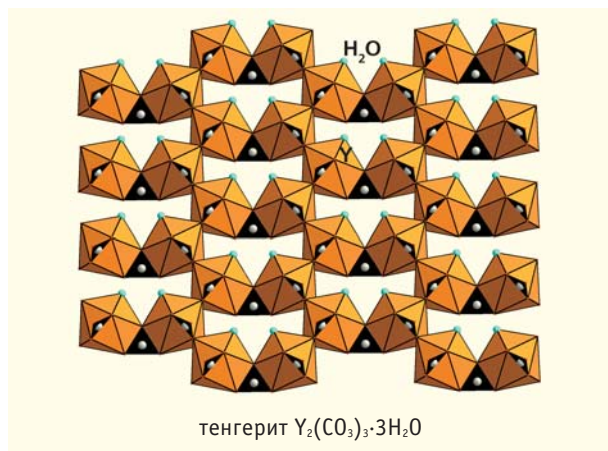
Пока простые одно- и двухвалентные граждане боролись за выживание, олигархи захватили все ресурсы. Благодаря своим богатствам (то бишь высоким зарядам) и крепким связям они построили особняки с просторными апартаментами, которые, впрочем, не отличаются изяществом, свойственным октаэдрам. Таким апартаментам понадобилось больше обслуживающего персонала. Но крошечные и беспомощные треугольники едва справлялись со своими обязанностями — гасить положительные заряды и укреплять громоздкие постройки. Однако великаны в них нуждаются,

а потому подстраиваются к их ребрам, жертвуя симметричностью своих апартаментов.

Дворцы олигархов прочные, и им не страшны засухи и потопы. Да и стоят они не в пустынях и всяких там содовых озерах, опасных для жизни. Есть места и получше.

**Лантанит**  $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  без посторонней помощи задумал постройку из крупных десятивершинников лантана. Но вот проблема: лишние заряды надо как-то гасить. Пришлось в полтора раза увеличить количество треугольников на душу лантана. Лантанит придвинул апартаменты друг к другу так, что они соединились ребрами в ряды, которые в другом направлении объединились вершинами в довольно дырявую стенку. Для ее упрочнения использовали карбонатные треугольники. Однако на все вершины полиэдров их не хватило, и пришлось использовать воду. Заодно добавили ее и между стенками, чтобы связать их водородными связями. И хотя вода (и входящая в апартаменты, и свободная) задействовала все свои связи, чтобы удержать вместе тяжелые стенки, постройка получилась не очень-то прочной. Несмотря на то что резиденцию назвали по лантану, цериевые и неодимовые родственники позаимствовали то же имя: лантанит-(Ce) и лантанит-(Nd). Но никто не в обиде, ведь все они друзья, выходцы из Швеции и Японии.

**Тенгерит** тоже родом из Швеции (живет близ Стокгольма). Он последовал примеру лантанита, увеличив количество треугольников на душу иттрия, но при этом убрал лишнюю воду. И облик постройки сильно изменился. Ряды сомкнулись вершинами, а устойчивость сооружения повысилась. Девятиугольные Y-апартаменты соединились угла-

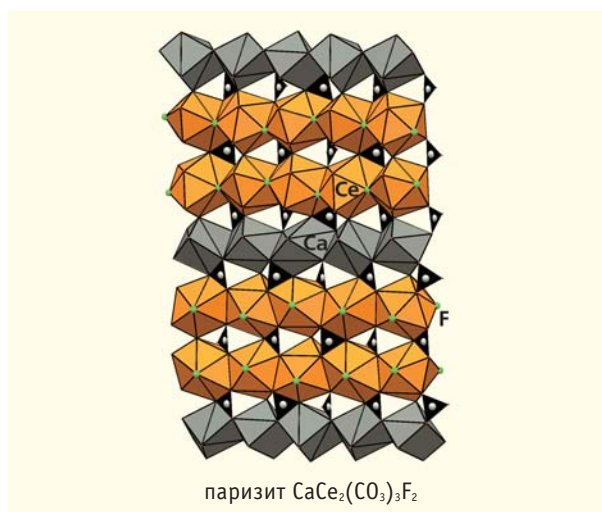


ми, образуя такие волнистые стенки, которым мог позавидовать сам Хундертвассерхаус в Вене. Не жалея своих ребер, треугольники зацементировали щели в стенках. Но их все равно не хватило, и один угол пришлось занять молекулой воды. Совсем без нее тенгериту обойтись не удалось.

**Анкилит**  $(\text{Ce}, \text{Sr})_2(\text{CO}_3)_2\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  из канадского Квебека умудрился сэкономить воду и треугольни-

ки за счет двухвалентного стронция. Его имя в переводе с греческого означает «искривленный», и кристаллы его округлые и кривые. (Ce, Sr)-десятивершинники соединяются всеми доступными средствами — гранями, ребрами и вершинами — в волнистые стенки. Треугольники трех ориентаций своими ребрами укрепляют постройку в трех направлениях. Свободные вершины крупных полиэдров заняты ОН-группами, которые дополнительно снабжают постройку водородными связями и гасят лишний положительный заряд.

**Бастнезит**  $\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}$ , названный по месту находки в руднике Бастнёс (Швеция), нашел простое решение, как погасить лишний заряд и вовсе не связываться с водой. Он пригласил фтора. Бастнезит, прибывший с «Горной Тропы» из Калифорнии, гордился тем, что он самый богатый и содержит более половины мировых запасов редких земель. Его друзьям — **синхизиту**  $\text{CaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$ , **паризиту** и **рентгениту**  $\text{Ca}_2\text{Ce}_3(\text{CO}_3)_3\text{F}_3$  — понравилась его резиденция с плоскими этажами. И они решили



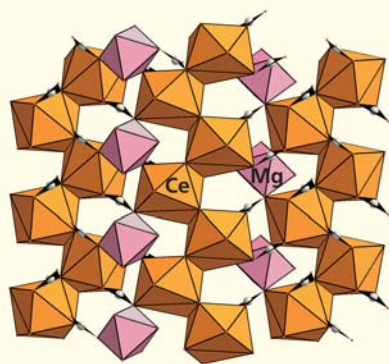
совместно организовать гостиничный бизнес, добавив к цериевым апартаментам еще и кальциевые (для удешевления проекта и привлечения клиентов со средним достатком). Синхизит и паризит очень похожи друг на друга. Первоначально синхизит даже был принят за паризит, поэтому его имя переводится с греческого как «путаница». В обеих гостиницах более мелкие кальциевые восьмиугольные апартаменты придвинуты вплотную друг к другу. Ca- и Ce-этажи, чередуясь, соединяются углами. Треугольники стороной прислоняются к одной стенке, а вершиной цепляются за соседнюю. При этом им приходится поворачиваться в разных направлениях. А фтор украсил один угол только в цериевых апартаментках.

В отличие от синхизита, в паризите церия в два раза больше, чем кальция, и потому в его гостинице больше элитных апартаментов (для богатого колумбийского владельца рудника Мусо, что в Боготе, — Х.Х.Париза). Сдвоенные этажи из крупных

одиннадцатигульных Се-апартаментов чередуются с этажами из более скромных Са-апартаментов.

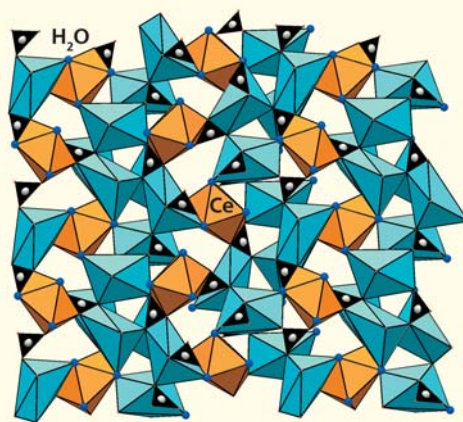
**Рентгениту**  $\text{Ca}_2\text{Ce}_3(\text{CO}_3)_3\text{F}_3$  повезло, ведь его назвали в честь знаменитого немецкого физика В.К.Рентгена. Рентгенит долго не мог придумать, чем ему отличиться от синхизита и паризита, и решил просто объединить в своем проекте оба варианта, чередуя этажи апартаментов Са-Се-Са-Се-Се-Са... В гостиницах всех четырех олигархов есть этажи с Се-апартаментами ( $\text{CeF}$ ) и подсобными помещениями для обслуживающего персонала ( $\text{CO}_3$ ), к которым иногда добавляются совмещенные этажи [ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ]. Ученые подсчитали, что высота этажа ( $\text{CeF}$ ) составляет 2.64 Å, ( $\text{CO}_3$ ) — 2.24 Å и [ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ] — 4.25 Å. Их комбинации определяют высоту гостиничного здания. В бастнезите содержатся только этажи ( $\text{CeF}$ ) и ( $\text{CO}_3$ ), в синхизите — ( $\text{CeF}$ )+( $\text{CO}_3$ )+[ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ], а в паризите — 2( $\text{CeF}$ )+2( $\text{CO}_3$ )+[ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ]. Самая высокая рентгенинская гостиница имеет восемь этажей: 3( $\text{CeF}$ )+3( $\text{CO}_3$ )+2[ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ].

**Сахамалит** же обошелся без фтора и кальция, используя магний, который и понизил заряд. Правда, количество треугольников выросло до двух на душу церия. Зигзагообразные стенки из связанных ребрами Се-девятивершинников объединяются одиночными Mg-октаэдрами. Треугольники, меняя свою ориентацию, дополнительно соединяют ребрами и вершинами эти полиэдры.



сахамалит  $\text{Ce}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_4$

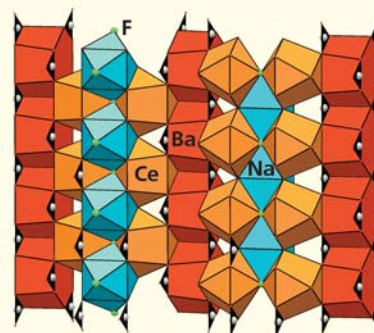
**Шомиокиту** повезло не сразу. Когда в конце прошлого века А.П.Хомяков открыл его на горе Аллуйв Ловозерского массива и назвал по месту находки у р.Шомиок, его кристаллы оказались непригодными для структурного исследования. Зато спустя четыре года удалось обнаружить подходящие кристаллы сразу в двух местах: на Кольском п-ове и в горном массиве Монт-Сент-Илер близ Квебека. И одновременно вышли две статьи, хорошо хоть в разных минералогических журналах — европейском и канадском. Авторы тоже были разные — российский (Р.К.Расцветаева) и канадский (Дж.Д.Грайс). А вот результаты оказались одинаковыми, если не считать того, что российскому автору удалось найти даже легкие атомы водорода.



шомиокит  $\text{Na}_3\text{Y}(\text{CO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Шомиокит решил пригласить натриевых беженцев, чтобы заполнить дешевую рабочую силу. Но их оказалось слишком много — больше, чем самого иттрия, аж в три раза. Одни из них бежали из пустынных районов, где велась война за воду, другие, напротив, спасались от наводнений, которые разрушили их дома. Неорганизованная толпа из разношерстных натриев со своими пяти-, шести- и семивершинниками, цепляясь друг за друга как придется (ребрами и вершинами), хлынула в лагерь размещения беженцев. Одиночные девятивершинники иттрия с трудом сдерживали их натиск. Треугольники, постоянно меняя ориентацию, изо всех сил старались всех объединить, используя все свои ресурсы — реберные и вершинные. А волонтеры снабдили всех водой, заполнив свободные от треугольников углы как в цериевых, так и в натриевых помещениях.

**Кордилит**, известный в массивах Нарсарсуак (Южная Гренландия) и Монт-Сент-Илер (Канада), в горнорудном районе Баян-Обо (Китай) и на Кольском п-ове, в переводе с греческого означает «булава», и его кристаллы напоминают скипетр. Минерал рассудил, что принимать беженцев слишком хлопотно. Рабочие они не очень-то квалифицированные (что взять с одновалентных?), зато среди них могут оказаться и террористы. Кордилит решил ограничить их количество и частично заменить барием, который своей солидностью и дис-

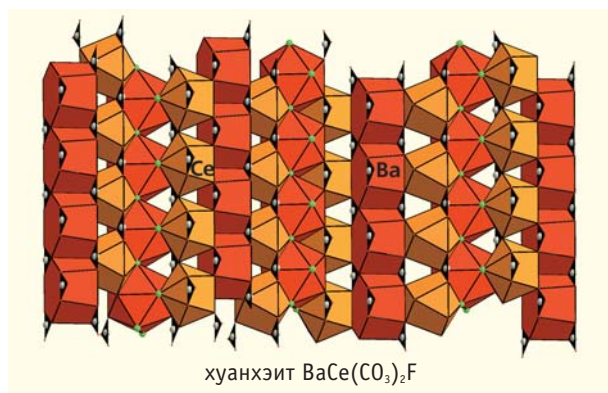


кордилит  $\text{BaCe}_2\text{Na}(\text{CO}_3)_4\text{F}$

циplinированностью придаст устойчивость любой постройке. Стенки из разнообразных апартаментов (Na-девятиугольных, Ce-десятиугольных и Ba-двенадцатиугольных) чередуются в определенном порядке Ba-Ce-Na-Ce-Ba..., а треугольники оказались зажатыми со всех сторон.

Неожиданно у кордилита объявились родственники. Два китайских геолога Фу и Су нашли в Баян-Обо похожий на него минерал. Назвали его по месту находки баянебоитом и даже успели утвердить в Комиссии. Но председатель Комиссии все-таки засомневался и аннулировал его. Однако китайские исследователи не успокоились. Еще один минерал, похожий и на кордилит, и на баянебоит, нашли Чен и Ми, однако не успели они придумать ему новое имя, как ученые из Венского университета доказали, что все эти минералы представляют собой обыкновенный кордилит. Конечно, китайским товарищам не повезло, но зато повезло кордилиту — самозванные родственники были устранены раз и навсегда.

А **хуанхэит**, названный по месту находки близ р.Хуанхэ в Китае, и вовсе отказался от натрия. Неизвестно, что эти беженцы могут натворить. Барий же — надежный партнер и уже зарекомендовал себя в кордилите. На этот раз китайским товарищам повезло больше. Минералогическое сообщество признало минерал новым. Чередуя Ba-полиэдры разной формы, хуанхэит превзошел кордилит в размерах ячейки и увеличил высоту здания с 23 до 38 Å. Гигантские Ba-двенадцативершинники и Ce-десятивершинники ребрами объединились в стенки. Особенно плотные стенки с треугольными окошечками, в которые втиснулись углеродные треугольники, построили бариевые полиэдры. Фтор занял все свободные вершины крупных полиэдров и также объединил стенки.



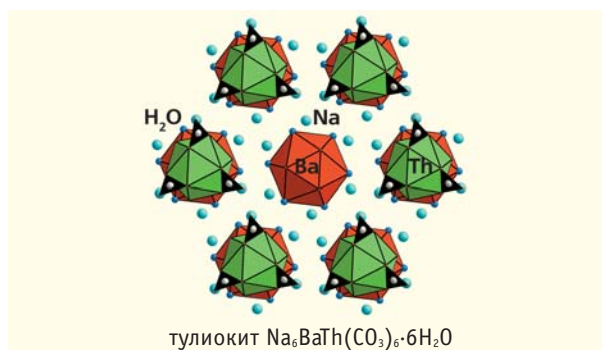
Но всех переплюнул **маккельвиит**, прибывший из Северной Италии и названный в честь директора Геологической службы США В.Э.Мак-Келви. Этот минерал превзошел кордилит разнообразием апартаментов и их обитателей, построив настоящий доходный дом. На одном этаже расположились десятиугольные апартаменты для крупных бариевых господ. На другом — помещения для



жилцов со средними габаритами (девятиугольные для иттрия и шестиугольные для кальция и натрия). Часть номеров оборудовали ванными. И во всех обязательно присутствуют треугольники, обслуживающие постояльцев, особенно высокопоставленных. Номера здесь не пустуют. Если съедет барий или кальций, тотчас вселяется стронций, если иттрий — то прибывает какой-нибудь редкоземельный господин. Только натрий — примерный постоялец и никуда не девается.

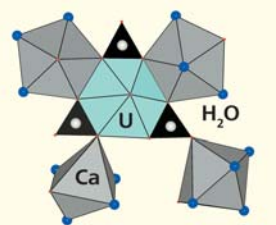
Но если барий исчезает надолго, то его полностью заменяет стронций. Как в доннейите. **Доннейит**  $Sr_3NaCaY(CO_3)_6 \cdot 3H_2O$  гордится тем, что его назвали в честь сразу двух кристаллографов из Университета Макгилла в Монреале — Д.Х.Доннея и его жены Г.Х.Донней. Минерал взял за основу проект **эвальдита**  $Ba(Ca,Y,Na,K)(CO_3)_2$ , но улучшил его за счет индивидуальных апартаментов с учетом размеров и вкусов постояльцев — Sr, Na, Ca и Y.

**Тулюокит** с кристаллами зеленого цвета назван по месту находки у р.Тулюок близ горы Куки-свумчорр Хибинского массива в компании с шортитом, тронной, термонатритом, натроном, натролитом, пирссонитом. Тулюокит пригласил изысканного тория поучаствовать в строительстве своей резиденции. Хотя торий и радиоактивен, тулюокит не пожалел о своем решении. Как и барий, торий разместился в икосаэдре (конечно, меньшем по размеру). Великолепные икосаэдры бария и тория, чередуясь, соединяются треугольными гранями в колонны. В углах крупных бариевых икосаэдров находится вода, а к ребрам мелких ториевых присоединяются треугольники. Все колонны объединяются восьмивершинниками натрия и H-связями молекул воды.



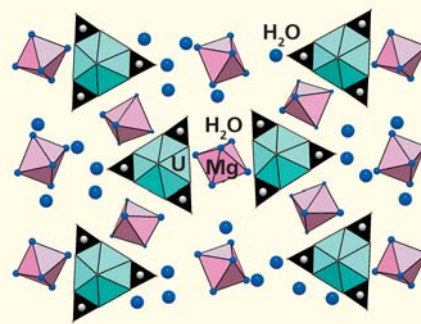
## Серия седьмая

По приглашению короля Кальцита в карбонатную страну приехал знаменитый хан Уран\*. Король его радушно принял и ввиду террористической угрозы выделил трех телохранителей — своих лучших углеродов в треугольной форме. Конечно, хан привык к более крупным телохранителям — кремнию, фосфору, селену, сере и мышьяку в тетраэдрических униформах и даже молибдену в октаэдрической. Но дареному коню в зубы не смотрят, и он смирился. Однако маленькие телохранители оказались усердными и надежными, ни на шаг не отходили от апартаментов и никого к хану не пропускали (включая жен и наложниц, которых тот привез с собой). Хан поселился в излюбленном шатре **либигита**, названного в честь немецкого химика Ю.фон Либиха. Правда, из-за малых размеров треугольных телохранителей хану пришлось перестраивать свои шатровые апартаменты так, что три стороны шестиугольника уменьшились до 2 Å, а три других удлинились до 3 Å. Симметричные шестиугольные шатры с одинаковыми сторонами в 2.5 Å, безусловно, выглядели бы лучше, но хану пришлось поселиться и в покосившиеся.

либигит  $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ 

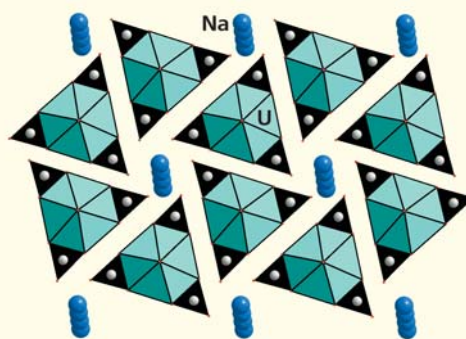
Ханские покои обслуживало четверо кальциевых слуг: двое в октаэдрической униформе, двое в семиугольной. Они гасили отрицательные заряды вспыльчивого гостя. Конечно, сам хан положительный (его заряд +6), но при нем всегда два визиря (атомы O), а они, как известно, коварные отрицательные персонажи. Вот и получается, что заряд хана вместе с визирями меньше —  $(\text{UO}_2)^{+2}$ . А если учесть трех телохранителей, постоянная подозрительность которых тоже отрицательно заряжена, то гасить приходится целых четыре заряда. Са-слуги неукоснительно соблюдали гигиену, для них установили по три-четыре ванны (в каждом свободном углу помещения). А между шатрами построили множество бассейнов, в которых купаются жены и наложницы (чем же еще им заниматься, если их не пускают к хану).

В своей загородной резиденции **бейлиите** хан решил обойтись без услуг кальция. Его магнєвые жены вполне могут гасить отрицательные заряды не хуже. И при этом им не надо пла-

бейлиит  $\text{Mg}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 

тить зарплату. Изолированные четырехгранные шатры с Mg разместились между урановыми шестигранными. И те и другие окружены многочисленными бассейнами. Воды оказалось так много, что на душу урана приходилось не 11 молекул, как в либигите, а 18. Если учесть, что кроме бассейнов в шатрах у жен в каждом углу стоит еще и ванна, то жены постоянно обитали в воде, как русалки.

Более полувека назад, когда химики синтезировали соединение  $\text{Na}_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ , никто и не думал о минерале **чешкаите**. Спустя 40 лет на полиметаллическом месторождении близ Яхимова в Чехии нашли бледно-желтые кристаллы такого же состава. Но на этом история не закончилась. Через два года такие же кристаллы обнаружили и в чернобыльской «лаве», образовавшейся в результате ядерной аварии на реакторе №4. Однако чернобыльские кристаллы остались без внимания — как не принадлежащие природе, а чешский образец Комиссия утвердила как новый минеральный вид. Его назвали не в честь Чехии, а в честь доктора наук Я.Чешки (J.Čejka), который

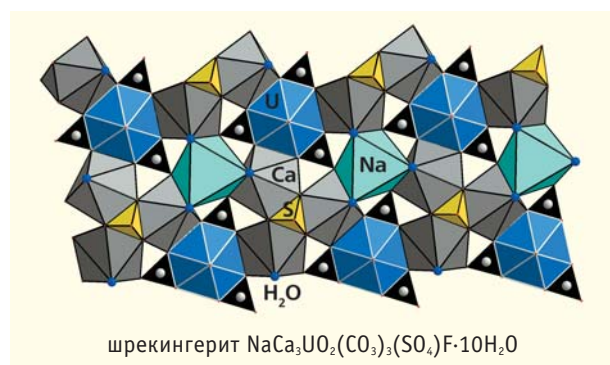
чешкаит  $\text{Na}_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ 

в то время занимал пост директора Национального музея в Праге. Но строение чешкаита все еще не было известно, так как мелкие кристаллики не годились для рентгеноструктурного исследования. И снова, как полвека назад, пришлось выращивать кристаллы, чтобы определить структуру минерала. Чешкаиту еще повезло, а вот у **виденманита** (названного в честь немецкого минера-

\* *Расцветаева Р.К.* Хан Уран и страна Уранофания // Природа. 2013. №4. С.62–72.

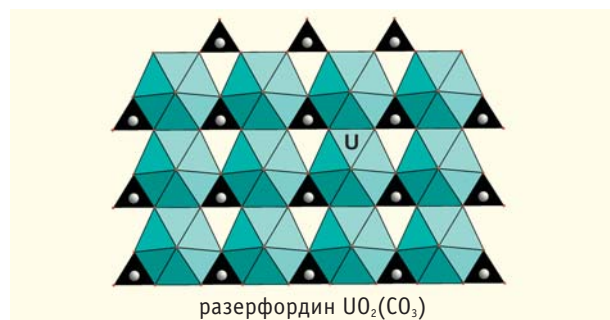
лога Д.Виденманна, открывшего урановые слюдки в Шварцвальде) и **раббитита** (как и у многих других бедолаг) строение до сих пор не изучено. Устройство чешкаита же оказалось уникальным. Шестигранные шатры разместились на разных уровнях, а между ними расположились однозарядные натриевые слуги, одетые в октаэдрическую и пятиугольную форму. Их понадобилось в два раза больше, чем кальциевых в либигите и магниевых в бейлиите. Натрии заполнили все пространство между шатрами, так что для бассейнов не осталось места.

Освоившись на новом месте, хан решил устроить праздник в своей новой резиденции **шрекингерите**, которую назвал в честь австрийского минералога У.Шрекингера, доставившего этот зеленовато-желтый минерал из того же Яхимова, где обитал и чешкаит. Хан пригласил кальция с натрием, но уже в качестве гостей, а в помощь телохранителям позвал серу. Перед тетраэдром серы стояла сложная задача обслужить трех кальциев и од-



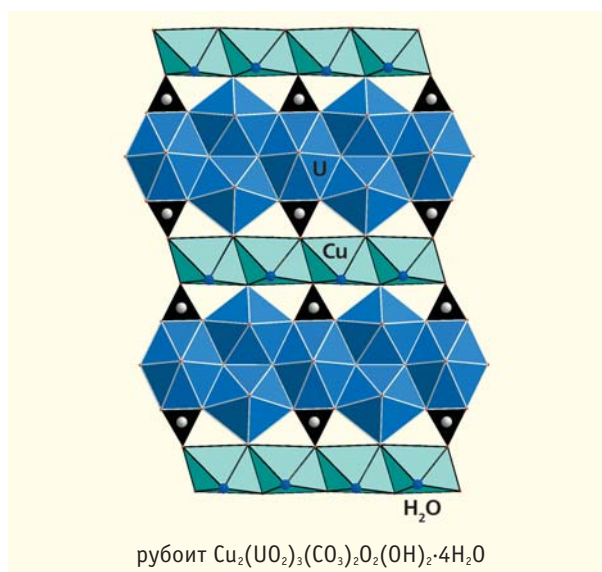
ного натрия. К счастью, скромный натрий отказался от охраны, а кальций в подражание хозяину обустроились в шестигранных шатрах, которые уголками соединились по трое так, что в промежуток между ними вставился тетраэдр серы. Свободной вершинкой он участвует еще и в водородных связях с соседним этажом. Ну а воды хоть отбавляй. Ее хватает и на ванны в Ca- и Na-шатрах, и на бассейны вокруг всех шатров. И хотя шрекингерит радиоактивен, все довольны и дружно уживаются.

Друзья хана не могли рассчитывать на трех телохранителей, им по чину полагался лишь один. Пришлось **разерфордину**, прибывшему из Кон-



го, сдвинуть шестигранные шатры и сомкнуть их ребрами в ряды, а углами — в стенки. Щели же между шатрами заделали треугольниками. Но как плотные стенки соединяются друг с другом? Ведь между ними нет ничего, даже воды. В таких случаях ученые все сваливают на таинственные вандерваальсовы силы. Разерфордин тоже радиоактивен, потому и назван в честь великого английского физика Э.Резерфорда.

Другому же ханскому другу из Заира не досталось ни одного целого телохранителя. Вернее, телохранители-то целые, но их два на трех уранов. **Рубоит**, названный в честь французского геолога М.Рубо из Университета Нанси, нашел выход. Он объединил шестигранный шатер с двумя пятигранными, и оба телохранителя достались шестигранным, которые сильно вытянулись, так как их торцевые стороны уменьшились, а боковые увеличились. Хотя пятигранным шатрам не досталось телохранителей, они не в обиде. Их с двух сторон надежно закрывают шестигранные шатры,



а сверху и снизу охраняют шеренги медных солдат в октаэдрической форме. Свободные вершины медных октаэдров заняты водой, а плотные стенки удерживаются слабыми водородными связями всех молекул воды.

## Эпилог

Огляделся вокруг король Кальцит и призадумался: «Сколько же проблем накопилось... Рано еще выходить на пенсию. Да и какие мои годы? Вон Роберт Габриэль Мугабе в свои 92 все еще на посту президента Зимбабве и не собирается его покидать. А в свой 91-й день рождения еще и стал председателем Африканского союза. Получил титул старейшего действующего руководителя государства на планете! А я чем хуже?». ■

# Неизвестные биоморфные структуры — природные образования или лабораторный артефакт?

Научные сообщения

Н.В.Козина,

кандидат геолого-минералогических наук

А.Ю.Леин,

доктор геолого-минералогических наук

О.М.Дара,

кандидат геолого-минералогических наук

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН  
Москва

Большинство научных открытий сделано после внедрения новых технологий или новых приборов. Появление в арсенале морских геологов пробоотборников, позволяющих сохранять без нарушения пограничный слой между водной толщей и донными отложениями, позволило обнаружить и исследовать так называемый наилкок — верхний флокулированный слой над осадками. Его толщина редко превышает 1–2 см, влажность  $\geq 90\%$ . В этом слое взвесь из рассеянной формы нахождения вещества переходит в связанную, т.е. в осадок [1]. Сверху из водной толщи наилок снабжается органическим веществом (ОВ), которое входит в состав взвеси. Это ОВ служит источником для существования микроорганизмов органотрофов. Снизу из осадочной толщи в наилок поступают восстановленные соединения ( $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  и др.), за счет окисления которых живут автотрофные микроорганизмы.

Наилок — самое заселенное микроорганизмами место морского дна. В 2012 г. в экспедиции на научно-исследовательском судне «Рифт» (39-й рейс, организованный Институтом океанологии) в рамках проекта «Система Каспийского моря» под руководством академика А.П.Лисицына, с помощью мультикорера (КУМ, Германия) были отобраны пробы наилка и поверхностных донных осадков в двух главных глубоководных котловинах Каспийского моря — Дербентской (станция 3907) и Южно-Каспийской (станция 3916) — на глубинах 720 и 1000 м соответственно (рис.1).

При изучении на сканирующем электронном микроскопе проб осадочного материала из наилка

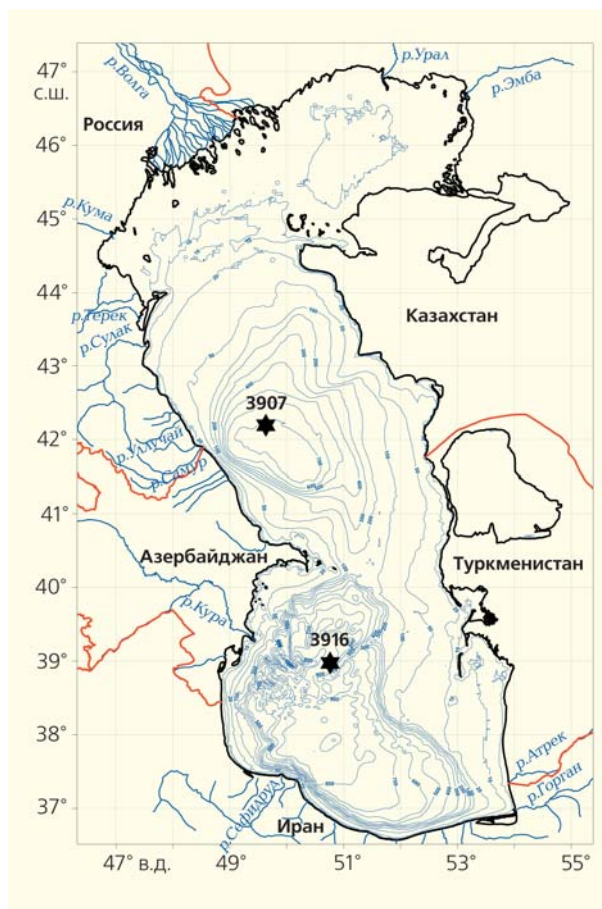


Рис.1. Расположение станций опробования в Каспийском море: 3907 (Дербентская котловина) и 3916 (Южно-Каспийская котловина).



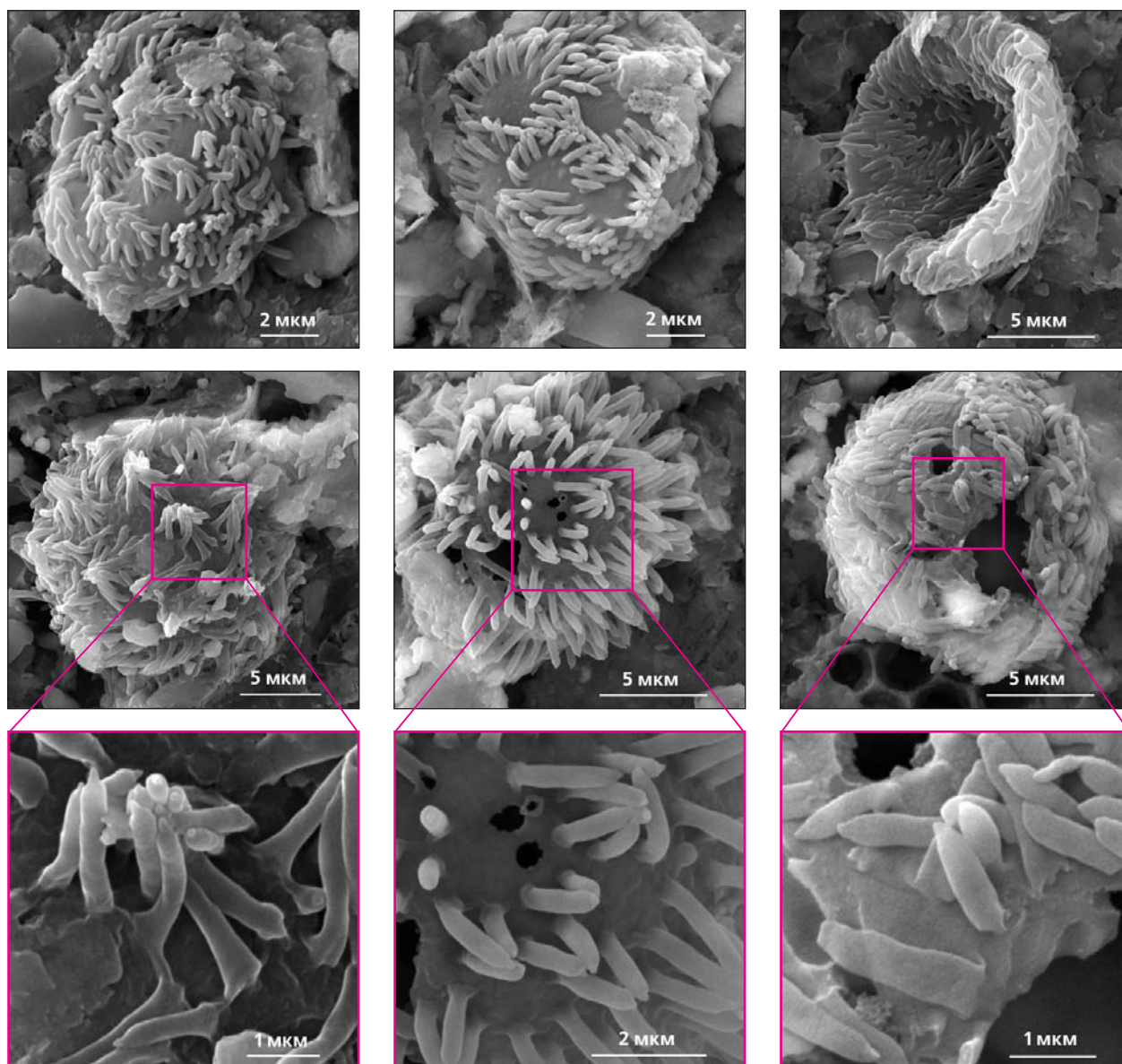


Рис.2. Микрофотографии биоморфных структур (аналитик В.А.Карлов).

и слоя 0.5–1 см донных осадков были обнаружены многочисленные биоморфные структуры (рис.2).

Наилкок отбирали из колонок мультикорера диаметром 10 см, с шагом 0.5 см (рис.3). Влажные пробы, хранившиеся в холодильнике при 0–5°C, наносили тонким слоем на алюминиевую подложку, напыляли золотом и просматривали на сканирующем электронном микроскопе (VEGA3 TESCAN, Чехия) с системой рентгеноспектрального микроанализа (INCA Energy, OXFORD Instruments, Великобритания). Пример регистрации спектра и состава биоморфных структур показан на рис.4.

При исследовании наилок и верхнего слоя донных осадков, вмещающего биоморфные структуры, использовали физико-химические, химические, биохимические, микробиологические, ра-

диоизотопные ( $^{14}\text{C}$ ) и минералогические методы, описанные в наших прошлых публикациях [1–5].

Температура воды у дна в Дербентской котловине составляет 5.5°C, а в Южно-Каспийской — 8°C. В водной толще обеих котловин глубже 600 м существуют восстановительные условия, присутствует  $\text{H}_2\text{S}$  (>0.4 мг/л) и  $\text{CH}_4$  (2200–3750 нл) [1–3, 6].

Концентрация сероводорода увеличивается от верхней границы его обнаружения к придонным горизонтам водной толщи, т.е. наилок в обеих котловинах находится в анаэробных условиях с активно протекающими микробными процессами сульфатредукции и метаногенеза [1]. В сероводородной зоне Дербентской и Южно-Каспийской впадин повсеместно фиксировался хлорофилл «а» (показывающий вклад фитопланктона), а низкая



Рис.3. Отбор наилка из колонки мультикорера на борту судна.

доля феофетина «а» (<40%) косвенно подтверждает слабую трансформацию хлорофилла «а», в том числе и в составе фекальных комков [7].

Наилкок на станции 3907 в Дербентской котловине состоит из серого хлопьевидного с запахом сероводорода пелитового ила, который постепенно переходит в более уплотненный, представленный чередующимися черными и охристыми слоями. В наилке (слой 0–0.5 см) содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) превышает 7% на сухой вес, а в подстилающих илах уменьшается до 5%.

Глинистые минералы (иллит, хлорит, каолинит, смектит, монтмориллонит) в слое 0–0.5 см составляют 32% и уступают по содержанию ( $\geq 40\%$ ) терригенным обломочным минералам (кварцу, полевым шпатам и др.). Сульфиды представлены рентгеноаморфным гидротроилитом. Пирит не обнаружен [8]. Общая численность микроорганизмов (после обработки проб ультразвуком) —  $520 \cdot 10^6$  клеток·см<sup>-3</sup>. Скорость сульфатредукции —  $7.38 \text{ мкг S} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ , скорость метаногенеза —  $24.1 \text{ мкл} \cdot \text{дм}^{-3}$ . С переходом в уплотненные осадки скорость сульфатредукции уменьшается вслед за уменьшением содержания  $C_{орг}$ .

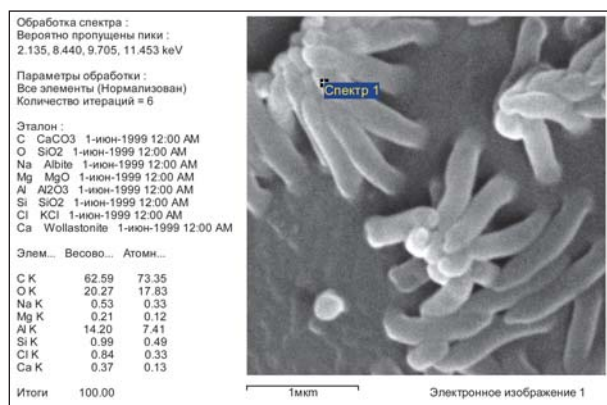


Рис.4. Спектр и состав биоморфных структур (пример рабочих материалов).

Наилкок в слое 0–0.5 см на станции 3916 в Южно-Каспийской котловине представлен черными и зеленовато-серыми хлопьями, также с запахом сероводорода. Подстилающий наилкок пелитовый ил — зеленовато-охристого цвета (полуокисленный), с многочисленными черными включениями гидротроилита. Содержание  $C_{орг}$  в слое 0–0.5 см составляет 8.7% и быстро уменьшается до 4.05% в слое 2–2.5 см. Сумма глинистых минералов 27%, а обломочных — 38%. Присутствует ~1% пирита [8].

В слое 0–0.5 см общая численность микроорганизмов составляет  $180 \cdot 10^6$  клеток·см<sup>-3</sup>. В подстилающем слое 0.5–1.5 см она увеличивается до  $8400 \cdot 10^6$  клеток·см<sup>-3</sup>, оставаясь высокой до горизонта 1.5–2.5 см. Скорости сульфатредукции и метаногенеза ( $78.4 \text{ мкг S} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  и  $30 \text{ мкл CH}_4 \cdot \text{дм}^{-3}$ ) также максимальны в горизонте 0.5–1.5 см, а не в слое 0–0.5 см, в котором обнаружено ураганно высокое содержание  $C_{орг}$ .

Таким образом, в Дербентской котловине биохимические процессы в наилке происходят с большей активностью, чем в подстилающих илах. В Южно-Каспийской же котловине, напротив, максимальные скорости процессов сдвинуты в подповерхностный слой 0.5–1.5 см.

Биоморфные структуры в обеих котловинах зафиксированы только в восстановленных поверхностных отложениях. На других участках дна они не обнаружены. Длина отдельных образований 1–2 мкм, диаметр 0.2–0.4 мкм. Содержание углерода в таких структурах составляет 60–70%, кислорода — 20–30% (рис.4), что однозначно доказывает их органическое (биогенное) происхождение. Сумма остальных элементов (Si, Al, Fe, Mg, Ca) не превышает 5%. Скорее всего они связаны с механической примесью пелитового материала из вмещающего осадка.

Приведенные нами данные характеризуют не только биоморфные структуры, но и условия среды, в которой они обнаружены. Большую помощь в изучении этих образований нам оказал сотрудник Института океанологии А.Ф.Сажин.

К сожалению, установить систематическую принадлежность биоморфных структур не удалось. Так, один из ведущих микробиологов нашей страны, В.Ф.Гальченко, ознакомившись с приведенными фотографиями (рис.2), со всей определенностью дал отрицательный ответ относительно принадлежности биоморфных структур к бактериям и в целом к известным микроорганизмам.

Консультации с протистологами и микробиологами Института океанологии и микробиологии РАН, биологического факультета Московского государственного университета, Института микробиологии Бергенского университета (Норвегия), Саутгемптонского университета (Великобритания) не привели к разгадке генезиса обнаруженных нами биоморфных образований.

В заключение подчеркнем, что биохимические исследования слоя на границе водной толщи

и донных отложений в глубоководных котловинах Каспия с использованием современных приборов и методов анализа проводятся впервые. Все это не исключает возможности обнаружить и другие новые формы организмов и биологических структур.

Есть надежда, что заинтересованный читатель, ориентируясь на приведенный нами фактический материал, сможет определить систематику биоморфных структур или аргументировано сообщить о лабораторном артефакте. ■

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-27-00114). Часть анализов (рентгенодифрактометрический, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный и др.) исследуемого материала выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-35-60028).**

## Литература

1. *Lein A.Yu., Savvichev A.S., Kravchishina M.D. et al.* Microbiological and biogeochemical properties of the Caspian Sea sediments and water column // *Microbiology*. 2014. V.83. №5. P.648–660.
2. *Иванов М.В., Саввичев А.С., Клювиткин А.А. и др.* Возобновление сероводородного заражения водной толщи глубоководных впадин Каспийского моря // *Докл. АН*. 2013. Т.453. №1. С.76.
3. *Козина Н.В.* Минеральный состав донных отложений и особенности современного осадконакопления в Каспийском море: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2015.
4. *Lein A.Yu., Русанов И.И., Клювиткин А.А. и др.* Биохимические процессы в водной толще Каспийского моря в ноябре 2008 года // *Докл. АН*. 2010. Т.434. №6. С.786–790.
5. *Lein A.Yu., Русанов И.И., Кравчишина М.Д., Иванов М.В.* О генезисе органического и карбонатного углерода в осадках Северного и Среднего Каспия (по изотопным данным) // *Литология и полезные ископаемые*. 2012. №4. С.319–332.
6. *Амбросимов А.К., Клювиткин А.А., Гольдин Ю.А. и др.* Комплексные исследования системы Каспийского моря в 39-м рейсе научно-исследовательского судна «Рифт» // *Океанология*. 2014. Т.54. №3. С.428–432.
7. *Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Паутова Л.А. и др.* Хлорофилл «а» во взвеси Каспийского моря как показатель условий биогенной седиментации // *Океанология*. 2015. Т.465. №3. С.357–362.
8. Первая находка кутнагорита в современных отложениях Южно-Каспийской котловины // *Докл. АН*. 2015. Т.465. №5. С.572–576.

# Глубинные источники вулканизма на Кавказе

И.Ю.Кулаков,

доктор геолого-минералогических наук

И.В.Забелина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.А.А.Трофимука СО РАН  
г.Новосибирск

Горы Кавказа — часть Альпийско-Гималайского складчатого пояса, который образовался в результате столкновения континентальных литосферных плит. Их постоянный рост в течение последних 20 млн лет обеспечивается движением в северном направлении со скоростью 2.5 см в год

Аравийской плиты навстречу Скифской. Структурно выделяют два горных пояса — Большой и Малый Кавказ, разделенные Закавказским межгорным прогибом.

В течение нескольких миллионов лет в Кавказском регионе происходили интенсивные вулканические процессы [1]. Известно, что красавец Эльбрус представляет собой спящий вулкан,

по размеру и форме схожий со знаменитыми «собратьями» — Ключевской сопкой на Камчатке и Фудзиямой в Японии. Его последние извержения происходили не более чем 20 тыс. лет назад — почти вчера по геологическим меркам. Аналогичны по возрасту и структуре вулканы Казбек (Северная Осетия) и Арарат (Турция). Всего в горах Большого и Малого Кавказа десятки вулканических образований возрастом менее миллиона лет, каждый из них потенциально опасен, так как может возобновить свою активность.

На территории Малого Кавказа существенно более интенсивная вулканическая активность имела место в неоген-четвертичное время, начавшееся около 10 млн лет назад (рис.1). Более половины территории Армении и южной Грузии покрыто базальтовыми потоками возрастом 7–1.5 млн лет. На эти массивные лавовые поля накладываются молодые вулканические постройки (группы Арагац и Джавахети в Грузии и комплекс Герам в Армении) в основном андезитового состава, более соответствующего зонам субдукции (погружения литосферных плит на океанических окраинах), чем внутриплитным проявлениям вулканизма. Причина такого сложного сочетания различных типов вулканизма на территории Большого и Малого Кавказа — предмет горячих дискуссий геологов.

Эти вулканические проявления — результат случайного совпадения нескольких принципиально разных процессов или же они взаимосвязаны? Вопрос до сих пор остается открытым.

Попыткой ответить на него стали проведенные в регионе томографические исследования, в которых участвовали специалисты Института нефтегазовой геологии и геофизики им.А.А.Трофимука СО РАН и их коллеги из Грузии [2]. В результате удалось построить новые модели глубинных недр под Кавказом. При этом были использованы данные, зарегистрированные сейсмическими сетями Грузии, России, Армении и Азербайджана, а также Международного сейсмологического центра, располагающего информацией о сотнях тысяч землетрясений по всему миру.

Крупномасштабная модель (рис.2) охватывает глубины до 800 км, а мелкомасштабная — до 80 км. На рисунке красным цветом показаны области с пониженным значением сейсмической скорости, которые соответствуют зонам повышенной температуры. Синие аномалии совпадают с более холодными областями. По полученным данным можно сказать, что под горами Кавказа расположена крупная низкоскоростная аномалия, связанная с зоной повышенной температуры в мантии. К югу и северу от Кавказа прослеживаются высокоскоростные аномалии, имеющие весьма сложную форму. Согласно мелкомасштабной модели, в коре Кавказа также наблюдается чередование аномалий различного знака, причем «красные» расположены непосредственно под вулканами.

На основании томографической модели ученые предложили сценарий, который объясняет тектоническое развитие Кавказского региона и выявляет причины образования там вулканов. «Синие» аномалии к югу и северу от Кавказа — это корни континентальных литосферных плит, Аравийской и Скифской, которые движутся навстречу друг к другу. В нормальной ситуации такого рода плиты представляют собой прочные образования, которые перемещаются как единое целое. Однако при столкновении на границах плит происходят существенные структурные изменения, превращающие их в так называемый сэндвич с чередованием высоко- и низковязких слоев [3] (кулинарный термин предложил профессор Е.Буров из французского Университета Пьера и Марию Кюри, кото-



Рис.1. Распределение кайнозойского вулканизма на территории Кавказского региона. Вулканические области выделены голубым цветом, вулканы Грузии и Армении обозначены голубыми и розовыми крестами соответственно. Главные разломы Кавказа выделены точечными линиями. Красным контуром помечены вулканические провинции: ELB — Эльбруса, KZB — Казбека, CGR — Центрального Кавказа, DZH — Джавахети, ARG — Арагаца, GGM — Гегамы. Положение вертикального сечения обозначено фиолетовой линией.

рый впервые построил численную модель таких превращений). В результате самая прочная и тяжелая нижняя часть литосферы отрывается и тонет в мантии (процесс называется деляминацией), а оставшаяся приобретает чрезвычайную податливость и легко деформируется.

Томографические изображения мантии под Кавказом четко показывают каплеобразные структуры с повышенными сейсмическими скоростями, которые позволяют увидеть процесс деляминации. В результате отрыва мантийной части литосферы в зоне сочленения двух плит горячая астеносферная мантия (низковязкий слой, подстилающий литосферу, по которому скользят плиты) оказывается непосредственно под корой. Обычно нижний литосферный слой

служит своего рода изолятором, который не позволяет астеносфере сильно разогреть кору. При его отсутствии астеносфера аномально прогревает кору, образуя в ней зоны плавления. Часть магматического материала базальтового состава может выйти из мантии или нижнего слоя коры. По мнению авторов, именно такие источники привели к образованию огромных базальтовых полей в Грузии и Армении. В случае плавления верхней коры, имеющей, условно говоря, гранитный состав, образуются вулканы андезитового типа, которые слагают крупные красивые горные сооружения типа Эльбруса или Казбека.

Мелкомасштабная модель коры позволила ответить на вопрос, почему вулканические проявления широко наблюдаются в горах Большого и Малого Кавказа и почти не присутствуют в Закавказском межгорном прогибе. Сейсмическая томография выявила крупную аномалию с высокими значениями сейсмической скорости, которая разделяет «красные» области под хребтами Большого и Малого Кавказа. По-видимому, это

остаток древнего океана, литосфера которого оказалась прочнее окружающих его коллизионных (расположенных на линии столкновения различных тектонических плит) зон. Именно этот кусок древней литосферы предохраняет Закавказский прогиб от существенного тектонического сжатия и вулканизма.

Таким образом, с помощью сейсмической томографии удалось показать, что вулканизм Кавказского региона связан с аномальным прогревом земной коры астеносферой, расположенной непосредственно под границей кора—мантия. Мантийная часть литосферы, которая обычно предохраняет кору от излишнего прогрева, под Кавказом практически отсутствует. Ее отрыв происходит в сопредельных с Кавказом регионах вследствие коллизионных процессов и деляминации. Такой механизм погружения литосферы — достаточно распространенное явление для различных коллизионных областей, однако именно Кавказ стал уникальным по интенсивности вулканической активности регионом. ■

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-000430).

## Литература

1. Чернышев И.В., Лебедев В.А., Бубнов С.Н. и др. Новейший вулканизм Кавказа и закономерности его проявления во времени и пространстве (по данным геохронологических исследований) // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / Ред. Н.П.Лаверов. М., 2008. С.206–236.
2. Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I. et al. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography // Jour. of Asian Earth Sciences. 2016. №119. P.87–99.
3. Burov E.B., Watts A.B. The long-term strength of continental lithosphere: «jelly sandwich» or «crème brûlée»? // GSA Today. 2006. V.16. №1. P.4–10.

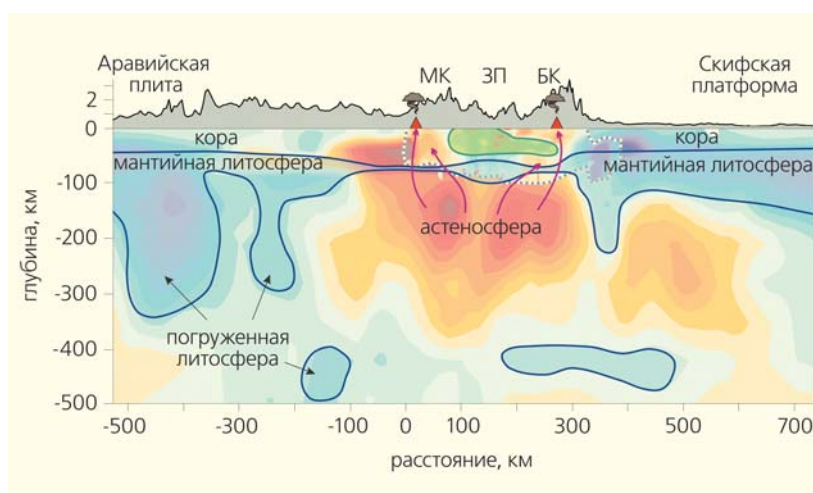


Рис.2. Вертикальное сечение с двумя наложенными вкост друг на друга томографическими моделями Кавказского региона. Сверху — рельеф над профилем. Синие области — возможная конфигурация мантийной литосферы. БК — Большой Кавказ, МК — Малый Кавказ, ЗП — Закавказский межгорный прогиб. Местоположение сечения показано на рис.1 фиолетовой линией.

# Природой очарованные странники

## Н.М.Пржевальский и его ученики

Времена и люди

А.И.Андреев,

доктор исторических наук

Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания

и техники им.С.И.Вавилова РАН

Санкт-Петербург

В 1886 г., 29 декабря, после завершения четвертой экспедиции Николая Михайловича Пржевальского (1839–1888) в Центральную Азию, Академия наук наградила путешественника Большой золотой именной медалью, на оборотной стороне которой были выбиты слова: «Первому исследователю природы Центральной Азии».

И действительно, Пржевальский положил начало всесторонним, комплексным исследованиям этого обширного региона, охватывающего Монголию, западные провинции Китая и Тибет, т.е. территорий, входивших в ту пору в состав Цинской империи. Главная цель — географическое и естественноисторическое познание этих малоизученных стран, а конечным результатом стало создание новой, научно достоверной, карты Центральной

Азии и характеристика основных компонентов (рельефа, климата, растительности и животного мира) природного комплекса региона [1].

О путешествиях и открытиях Пржевальского написано немало, но есть одна тема, заслуживающая отдельного рассмотрения, — это отношение путешественника и его ближайших учеников и сподвижников В.И.Роборовского (1856–1910) и П.К.Козлова (1863–1935) к природе как таковой. Природа была для них, как географов-натуралистов, не только объектом пристального изучения и описания, но и предметом любования и созерцания, восторженного и даже экстатического, что нашло отражение в их отчетных трудах. А Козлов также занимался активной природоохранной деятельностью в ранний советский период [2].

Вот яркий пример особого отношения к природе Пржевальского, который так описал открыв-

© Андреев А.И., 2016



Слева направо: Н.М.Пржевальский, ок. 1887 г.; В.И.Роборовский, 1890-е гг.; П.К.Козлов, ок. 1910 г.

Здесь и далее фото из фондов Музея-квартиры П.К.Козлова (Санкт-Петербург).

шуюся ему «дивную панораму» с вершины горы Соди-Соруксум в Южно-Тэтунгском хребте, самом «роскошном» уголке Центральной Азии, в ходе своего первого путешествия (1870–1873): *Долина Тэтунга, узкие ущелья, прихотливо сбегающие к ней со всех сторон, Северный хребет и его снеговые вершины далеко на западе — все это явилось в такой чудной картине, какую невозможно передать словами. Я первый раз в жизни находился на подобной высоте, впервые видел под своими ногами гигантские горы, то изборожденные дикими скалами, то оттененные мягкой зеленью лесов, по которым блестящими лентами извивались горные речки.*

**Сила впечатления была так велика, что я долго не мог оторваться от чудного зрелища, долго стоял, словно очарованный, и сохранил в памяти этот день как один из счастливейших в жизни\*** [3, с.244–245].

А вот другой пример — отрывок из отчетного труда Николая Михайловича о его третьей центральноазиатской экспедиции: *О! Сколько раз при своих путешествиях я был счастлив, взбираясь на высокие горные вершины! Сколько раз завидовал пролетающему мимо меня грифу, который может подняться еще выше и созерцать панорамы, еще более величественные! Лучшим делается человек при подобной обстановке; словно, поднимаясь ввысь, он отрешается от своих мелких помыслов и страстей. И надолго, на целую жизнь, не забываются подобные счастливые минуты...* [4, с.420].

Эта влюбленность в природу была присуща и его ученикам. Так, например, Роборовский записал в дневнике в начале собственной экспедиции 1893–1895 гг.: *Да, мы покинули цивилизованную жизнь, полную всяких стеснительных так называемых удобств, и начали новую свободную жизнь — полную наслаждений природой* [5, с.17].

А вот как Козлов передает свои ночные впечатления в пустыне Алаша на заключительном этапе Монголо-Сычуаньской экспедиции (1907–1909): *Ночи в пустыне бывали действительно обаятельные. Свежий прозрачный воздух прохладной струей вливался в усталую грудь; ясное, глубокое небо сияло особенно близкими, особенно яркими звездами, и торжественная чуткая тишина ласкала душу... Сколько раз в пустыне Гоби приходили мне на память грустные и вместе с тем прекрасные строки моего любимого поэта*



Караван Монголо-Сычуаньской экспедиции П.К.Козлова (1907–1909) при переходе через пустыню.

*М.Ю.Лермонтова: «Ночь тиха; пустыня внемлет богу, и звезда с звездою говорит»* [6, с.294–295].

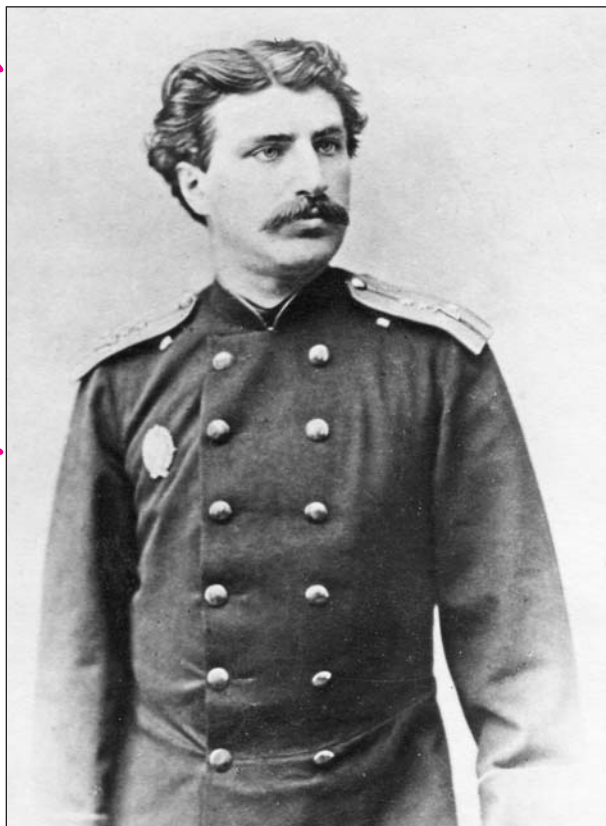
В приведенных цитатах Пржевальский, Роборовский и Козлов открываются перед нами с необычной стороны: они не только путешественники-натуралисты, но и люди, обладавшие особо тонким чувством эстетического восприятия Природы (с большой буквы), — *природой очарованные странники*, говоря словами Ар.Н.Фатеева, одного из биографов Пржевальского. Тот же Фатеев\* отмечает, что исследователь-первопроходец Центральной Азии обладал «синтетическим взглядом на природу и человека: от геосферы к психосфере» [7, с.3]. Для Пржевальского было характерно целостное восприятие природного комплекса (геосистемы, говоря современным языком). Природа понималась им как нераздельная совокупность всех органических форм, существующих на планете, — от микроорганизмов до человека, и ее познанию он и его ученики и последователи посвятили всю свою жизнь. Фатеев приводит «всеобъемлющую формулу» Пржевальского [7, с.3], по сути, философское кредо путешественника, слова, которые тот любил повторять: *Единая земля, единое человечество, единый закон его — справедливость.*

## Жизнь и путешествия

Пржевальский родился и вырос в Кимборово — имении своих родителей на Смоленщине, среди дремучих лесов, голубых озер и речек, ставших для него естественной средой обитания. Отсюда для него появилось позднее неприятие «неестественности»

\* Аркадий Николаевич Фатеев (1871–1952) — юрист по образованию, специалист по социальной географии и по философии права. После революции — профессор, преподавал во многих русских университетах в Чехословакии.

\* Здесь и далее выделено автором.



Пржевальский накануне его первой экспедиции в Уссурийский край, 1867 г.

венной» городской жизни, делающей человека рабом всевозможных условностей и мелочной суеты. *Рос я в деревне дикарем* — рассказывает он в своей автобиографии (1888), — *воспитание было самое спартанское, я мог выходить из дома во всякую погоду*. Он и его братья, Владимир и Евгений, гуляли одни в лесу, где водились разные звери, в том числе и медведи, лазали по деревьям, и это с ранних лет привило Николаю вкус свободы — абсолютной, дикой, такой, какую не променяешь ни на что на свете. Именно она, эта свобода, делает человека по-настоящему счастливым, поскольку восстанавливает первозданную связь человека и природы.

Первым воспитателем Пржевальского был дядя (брат матери) Павел Алексеевич Каретников, который обучал Николая и его брата Владимира французскому языку, а также стрельбе и охоте. «Под его влиянием, — отмечает М.А.Энгельгардт\*, — развилась в мальчике рано пробудившаяся

\* Михаил Александрович Энгельгардт (1861–1915) — русский писатель, публицист, социолог. За участие в революционном движении был арестован в 1881 г. и сослан, в годы ссылки состоял в переписке с Л.Н.Толстым. Знаменитое письмо Толстого «О насилии (о непротавлении злу злом)» адресовано Энгельгардту. Автор жизнеописаний выдающихся ученых, изданной в серии «Биографическая библиотека» Ф.Ф.Павленковым.

я любовь к природе, превратившаяся наконец в **истинную страсть** и создавшая из него путешественника-натуралиста» [8, с.342–343].

Обучаясь в Смоленской гимназии (которую закончил в 1855 г.), Пржевальский проводил лето в родительском имении, в деревне, где занимался охотой и рыбной ловлей, остававшимися до конца жизни его любимым времяпрепровождением. В своем автобиографическом очерке он рассказывает: *Летом и на праздники обыкновенно я уезжал домой, в деревню; у меня было отцовское ружье; я порядочно владел им и даже подчас позволял себе стрелять в домашних птиц и даже индюков. Однако это не мешало мне увлекаться чтением зоологических книг и путешествий, которые выписывала мать. Но всего больше нравились мне дикие леса, и, приезжая в деревню, я проводил в них целые дни...* [9, с.478].

По окончании гимназии Николай Михайлович поступил юнкером в Белёвский полк и отправился с ним в поход — свое первое путешествие. Под влиянием событий Крымской войны и случайно прочитанной книжки «Воин без страха», из разряда бульварного чтива, он мечтал о воинских подвигах. Но уже очень скоро к нему придет разочарование от армейской службы и, более всего, от своих сослуживцев, которых он презрительно называл «всяким сбродом». *Моим единственным утешением было ружье, выписанное из деревни, с которым я постоянно ходил на охоту, — скажет он впоследствии, — кроме того, получив в гимназии сведения из зоологии и ботаники, я пристрастился к собиранию цветов* [9, с.479].

Находясь со своим полком в г.Кременце (Волынской губернии), в 1860 г. Пржевальский готовился к поступлению в военную академию в Санкт-Петербурге, чтобы осуществить свою давнюю мечту о путешествиях в дальние неизведанные края. Именно в то время он пишет небольшую заметку «О происхождении жизни на Земле» (датирована 6 января 1860 г.) — по сути, это конспект доклада, прочитанного в кружке своих товарищей, младших офицеров, увлеченных, как и он, естествознанием. В ней Николай Михайлович выступил сторонником эволюционной теории Ч.Дарвина, а сама заметка, по мнению Б.А.Вальской [10, с.95], возможно, была написана им в связи с выходом в свет в 1859 г. знаменитого труда английского натуралиста «Происхождение видов...». Пржевальский сравнивает жизнь «целой природы» с жизнью «отдельного животного организма», очевидно, под влиянием собственных наблюдений, и приходит к следующему выводу: *Как жизнь каждого животного есть постоянное возобновление, так и жизнь целого организма природы есть постоянное обновление, умирание и возрождение частей ее — растений и животных. Смотря с такой точки зрения на жизнь последних, мы невольно приходим к заключению, что каждое тело органическое, растение, животное и человек не есть*



отдельная жизнь, а только часть общей жизни, атом того огромного целого, которое мы называем природой. Его возрождение, жизнь и умирание находится в тесной зависимости с жизнью самой природы, а не есть особенная, отдельно действующая сила [11, с.102–103].

Уже в этих словах можно увидеть синтетический взгляд Пржевальского на природу. Но что такое сама природа, какие законы и условия определяют ее деятельность — на эти вопросы молодой Пржевальский пока не может дать ответа. Они, как он пишет в своей заметке, остаются тайной стороной наших исследований, которую не смогли постичь и великие гении Кювье, Гумбольдт, Одюбон [11, с.104].

Чтобы понять, как формировалось мировоззрение молодого ученого, его взгляды на окружающий мир и природу, достаточно заглянуть в его библиотеку и познаться с книгами, которые он читал в годы, предшествующие его первым путешествиям. Прежде всего это книги таких корифеев, как А. фон Гумбольдт, К.Риттер, П.Лаплас, а также сочинения ряда западных авторов — популяризаторов научных знаний в переводах на русский язык, которые с увлечением читали в эти годы в России\*. Будучи последователем Гумбольдта и Риттера, Пржевальский, однако, сохранил свой особенный взгляд на природу — восхищенный и «сочувственный», взгляд истого природолюбца.

Вот, например, как молодой Пржевальский, еще только мечтающий о далеких странствиях, рассказывает в своем очерке «Воспоминания охотника» о том, как Днепр освобождается весной от ледяных оков: *Тяжелые льдины громоздятся одна на другую; скорей и скорей хочет освободиться от них река и разлиться на широкое раздолье. По несколько часов сряду бывало я любовался на подобную картину и не хотел оторваться от нее. Как-то легко и свободно было на сердце при виде этого приволья, этой могучей борьбы. Да, пусть говорят, что хотят, но то верно, что в сочувствии к природе есть что-то особенное, что-то бесконечно глубоко...* [12, с.491].

Подобное «сочувственное» отношение к природе не было чем-то необычным в контексте той

эпохи. Так, Фатеев сравнивал Пржевальского с его старшим современником И.С.Тургеневым. Оба они — и Тургенев, и Пржевальский — «страстные немроды\*\*», природой очарованные странники». Фатеев цитирует затем слова Тургенева, которые вполне мог бы произнести и Пржевальский: «Ничто так не освобождает человека, как знание природы» [12, с.145]. И далее приводит совершенно удивительный и мало кому известный сегодня факт: Тургенев в молодости ходил на свидание с молодой липой и, обнимая ее ствол, думал, что обнимает «всю природу» [12, с.147]. Пржевальский, по словам Фатеева, чувствовал в себе «слияние природы и своего существа». «В эти мгновения, как и любимый им Лермонтов, он мог говорить о себе: “И в небесах я вижу Бога”. В этих чувствованиях разгадка пристрастия его [Пржевальского] к пустыни».

Путешествия давали Пржевальскому редкую возможность — совершать географические открытия, изучать неизвестную фауну и флору посещаемых им мест и одновременно созерцать новые природные миры, постоянно меняющиеся и привлекающие своей новизной образы «дикой» — девственной — природы. Это бескрайние степи и обжигающие жаром пустыни, кристально прозрачные речушки и озера и величественные горные массивы, бесконечно разнообразный животный и растительный мир Центральной Азии. Но на первом месте у Пржевальского, как и у его учеников, Роборовского и Козлова, стояли научные естественно-географические исследования, ибо они путешествовали по Центральной Азии, конечно же, не для того, чтобы любоваться картинами природы, удовлетворяя свои эстетические потребности. Так, в предисловии Козлова к описанию его Монголо-Сычуаньской экспедиции (1907–1909) читаем: *В тайнике души я лелеял заветные мысли найти в пустыне Монголии развалины города, на Куку-норе — обитаемый остров, в Сычуани — богатейшую флору и фауну... Роскошная природа Сычуани, ее бамбуковые заросли, оригинальные медузы, обезьяны, а главное чудные лофофоры\*\*\* (Lophophorus lhuysi) — лофофоры, о которых до*

\* Отмечу такие книги, как: *Гумбольдт А.* Космос. Опыт физического мироописания. Ч.1. СПб., 1862; *Риттер К.* Землеведение. География стран Азии, находящихся в непосредственном сношении с Россией: Восточный, или Китайский Туркестан. Вып.1. СПб., 1869; *Лаплас П.* Изложение системы мира. Т.1. СПб., 1861; *Гартинг П.* Очерки природы. М., 1860; *Гартвиг Г.* Чудеса подземного мира. СПб., 1863; периодические издания, в частности «Вестник естественных наук», издававшийся Императорским Московским обществом испытателей природы, и позднее (в 1870-х годах) популярный естественноисторический сборник «Природа». Эти книги находятся ныне в библиотеке Дома-музея Н.М.Пржевальского в Смоленском государственном музее-заповеднике (национальном парке «Смоленское Поозёрье»).

\*\* Нимрод (Немрод, Нимврод, Немврод) — в Пятикнижии, агадических преданиях и легендах Ближнего Востока — герой, воитель, охотник и царь. По родословию, приведенному в Книге Бытие, сын Куша и внук Хама, основатель Вавилонского царства, ему приписывается строительство Вавилонской башни. В Книге Бытие приводится поговорка: «Сильный зверолов, как Нимрод, перед Господом [Богом]». Отсюда в переносном смысле — всякий охотник.

\*\*\* Фазан китайский монал (*Lophophorus lhuysi*) — обитатель высокогорий (от 3300 до 4500 м над ур.м.) на севере и северо-востоке Сычуани. Предпочитает альпийские и субальпийские луга с зарослями рододендрона, обитает и в хвойных лесах. Питается цветами, листьями и почками, а также насекомыми и другими мелкими животными. У самцов очень красивое блестящее оперение, а окрас самок — от серого до рыжего.

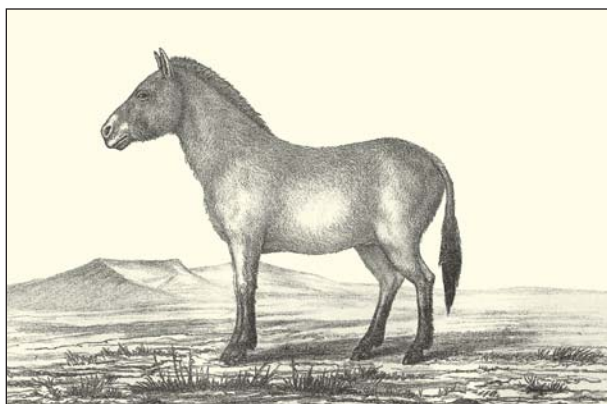


Состав четвертой экспедиции Н.М.Пржевальского (1883–1885). На переднем плане (слева направо): Козлов, Пржевальский, Роборовский.

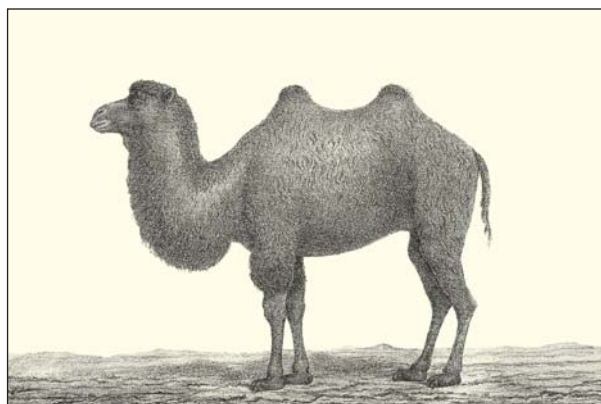
*последних дней жизни восторженно мечтал Н.М.Пржевальский, — манили к себе, не переставая [6, с.22].*

Помимо Сычуани Пржевальский мечтал побывать и в других труднодоступных, заповедных уголках Центральной Азии: добраться до «запретной», недоступной для чужеземцев Лхасы, столицы далай-ламского Тибета, и, если это удастся, пройти далее на юг, к верхнему течению Брахмапутры

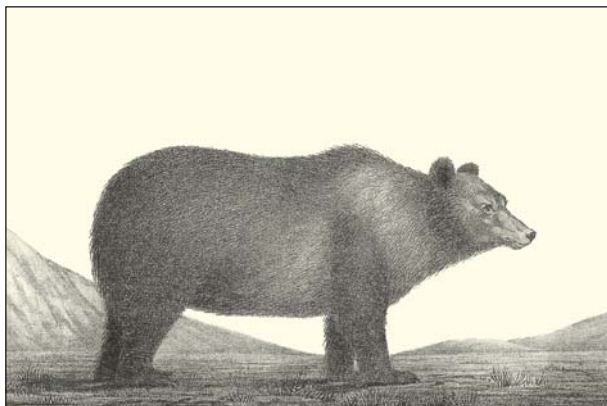
(Цангпо) и подняться на северные склоны Гималаев. Этим мечтам, однако, не суждено было осуществиться. Но он увлек ими своих учеников и последователей, прежде всего Козлова (что касается Роборовского, то после перенесенного им инсульта в 1895 г., в ходе его первой и единственной самостоятельной экспедиции, он практически оставил географическое поприще и, страдая от паралича, тихо скончался в своем имении в 1910 г.).



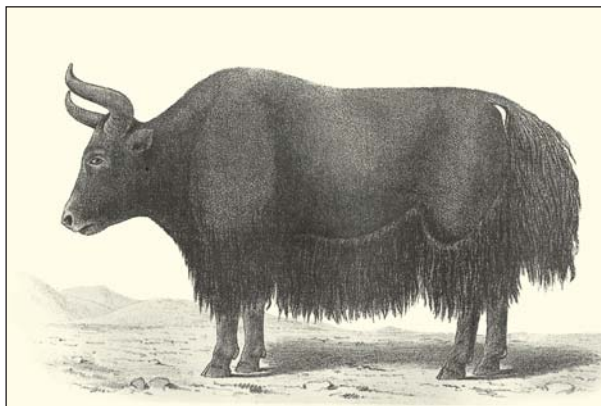
Дикая лошадь (*Equus przewalskii*), открытая Пржевальским. Рисунок В.И.Роборовского [4, вклейка между с.40 и 41].



Дикий верблюд. Рисунок В.И.Роборовского [4, вклейка между с.42 и 43].



Тибетский медведь-пищуход (*Ursus lagomyiarius*) — новый вид, найденный Пржевальским на нагорье Северного Тибета. Рисунок В.И.Роборовского [4, вклейка между с.216 и 217].



Тибетский як (*Poëphagus mutus*) — новый вид, найденный Пржевальским. Рисунок В.И.Роборовского [4, вклейка между с.190 и 191].

Пржевальский, как известно, совершил пять больших экспедиций: в Уссурийский край (1867–1869) и в Центральную Азию (1870–1873, 1876–1877, 1879–1880, 1883–1885). Умер он на берегу живописного озера Иссык-Куль, на пороге своего шестого путешествия, конечной целью которого, как и двух предыдущих, была недоступная, а потому манившая его с такой силой Лхаса. Возвращаясь в Россию после своих долгих и изнурительных странствий, Николай Михайлович обычно проводил короткое время в Петербурге, чтобы отчитаться перед руководством Императорского Русского географического общества (ИРГО) и Главного штаба, главных организаторов своих экспедиций. И затем торопливо уезжал в Отрадное, свое имение в Смоленской губернии, а после 1881 г. — в Слободу\*, приобретенное им новое поместье, на лоно природы, где только и мог быть по-настоящему счастливым. Там он писал отчетные труды о своих путешествиях, которые издавались ИРГО и пользовались огромной популярностью у российских читателей. В их глазах Пржевальский, посвятивший всю свою жизнь служению науке и любимой отчизне, был героем, образцом для подражания. Но многочисленные почитатели путешественника мало знали о его личной жизни и его странностях.

Из черт личности прежде всего обращает на себя внимание явная асоциальность путешественника. Пржевальского томит жизнь в социуме, в первую очередь суетливая городская жизнь. Он убежденный холостяк и, более того, мизогин — противник традиционного брака, ибо жена и семейные узы, по его мнению, становятся препятствием для мужчины, избравшего своим поприщем науч-

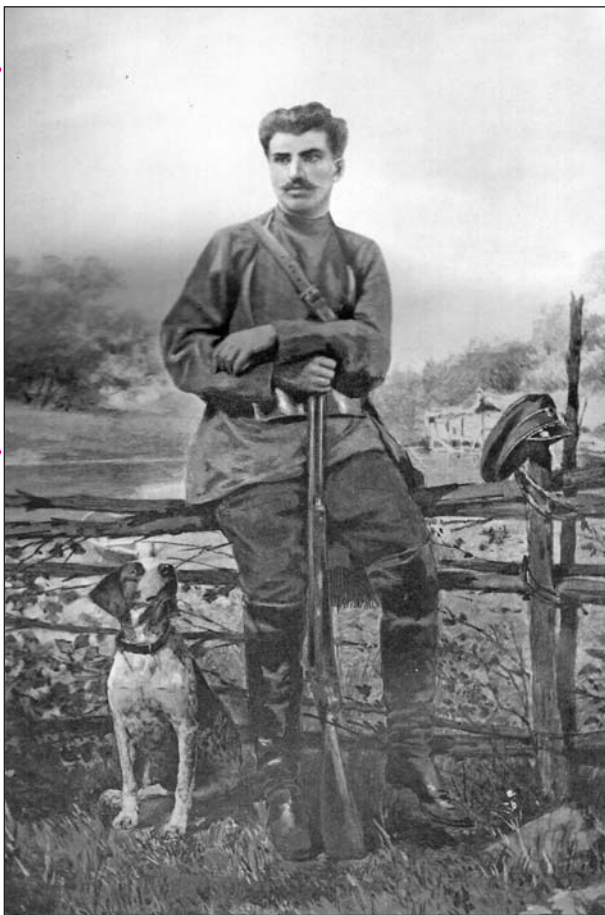
ные путешествия в далекие страны. В 1881 г. он пишет своему другу генералу Л.И.Фатееву: *Не изменю до гроба тому идеалу, которому посвящена вся моя жизнь. Написав, что нужно, снова махну в пустыню, где при абсолютной свободе и у дела по душе, конечно, буду стократ счастливее, нежели*



Дом Пржевальского в Слободу. Таким он был в конце XIX — начале XX в. — до того, как в августе 1941 г. его сожгли фашистские оккупанты, а сад и березовую рощу, посаженные путешественником, вырубili.

Из фондов Дома-музея Н.М.Пржевальского в Смоленском государственном музее-заповеднике (национальный парк «Смоленское Поозерье»).

\* Имение Слобода находилось в 40 верстах от Поречья, в 60 верстах от Духовщины и в 80 верстах от железнодорожной станции. В Слободу в 1881 г. произошла встреча Пржевальского и Козлова (родившегося в Духовщине), которая решила судьбу последнего.



Пржевальский на охоте. Фотокопия с картины А.А.Бильдерлинга.



Оз.Сапшо, на берегу которого располагалось имение Слобода.

в раззолоченных салонах, которые можно было бы приобрести женитьбой [13, с.365]. Биографы Пржевальского часто цитируют его слова: *Вольную птицу в клетке не удержишь*. «Клетка» для путешественника — это семейная жизнь, равно как и жизнь в большом городе. И потому он постоянно рвется на волю — в Азиатскую «пустыню», символ абсолютной свободы.

По словам Козлова, часто навещавшего своего учителя в Слободе, все его внимание в последние годы жизни было сосредоточено на охоте. «Охота и дикость природы в глазах Пржевальского имели особую прелесть. *Если в Слободе, — говорил он, — проведут железную дорогу, непременно продам ее и не куплю другого поместья в Европейской России, а поселюсь в Азии*» [14, с.42].

Естественную семью Пржевальскому заменяла походная, экспедиционная семья, по сути, мужское братство единомышленников — таких же, как он сам, холостяков и заядлых охотников, которые постоянно гостили у него в новом имении. В Слободе Пржевальский построил себе новый дом на берегу живописного оз.Сапшо, которое называл Байкалом в миниатюре (Отрадное он оставил из-за многолюдства и вырубки лесов в окрестностях поместья). *Отличное имение, — сообщал он друзьям по поводу покупки, — главное же — три озера, одно из которых, перед самым домом, имеет семь верст в окружности. Рыбы, зверей, птиц — гибель* [14, с.42].

Слободу Пржевальский превратил в свое «гнездо», откуда собирался летать «вглубь Азиатских пустынь». Здесь он развел фруктовый сад, в котором рядом с яблонями, вишнями и сливами росли кусты дикого ревеня, привезенного из Ганьсу, в парниках — хотанские арбузы и дыни, а на грядках — всевозможные ягоды. В саду перед домом был вырыт пруд, куда Пржевальский напустил рыб. В глубине же сада находилась сторожка, или «хатка», где, уединившись от всего мира, Пржевальский писал книги-отчеты о своих путешествиях. Заветной мечтой владельца Слободы, вспоминал Козлов, было развести зелень у самого дома так, чтобы всю весну пели соловьи. И когда он этого достиг, то был «страшно счастлив» [14, с.62].

Пример Пржевальского оказался заразительным. Роборовский, когда еще был в силах, мечтал построить себе домик в бору, возле речки; а Козлов обзавелся на склоне жизни, после завершения своей последней экспедиции, небольшим крестьянским домом в селе Стречно

Фото Т.Ю.Гнатюк

в Новгородской обл., неподалеку от Старой Руссы. Проживая в Ленинграде с женой Е.В.Козловой-Пушкарёвой, орнитологом по профессии, он приезжал в Стречно каждую весну (с конца 1920-х). Вокруг дома знаменитый путешественник развел сад, где поселились певчие птицы — скворцы, ласточки, соловьи, доставлявшие ему своими трелями огромную радость. Навестившая отца в 1931 г. дочь Ольга записала в дневнике: «Вставали мы рано и, быстро закусив, шли, как говорил отец, **слушать и созерцать природу**» [15, с.183].

Мысленно Козлов то и дело уносится в Горную Азию, в живописные уголки Восточного Тибета, где впервые побывал с Пржевальским. *Как бы я хотел теперь быть в Тибете, на Меконге,* — читаем в его стречнинском дневнике. — *Теперь я только одною мечтою могу побывать там — полюбоваться невыразимую красотой дикой величавой природы. Меня манят к себе заоблачные хребты с вечно снеговыми, горящими на солнце вершинами, манят альпийские луга, ущелья, скалы с фиолетовой дымкой, шум водопадов. Так бы и полетел туда стрелою в мир чистый, девственный, полный очарования, гармонии...\**

\* Из личного дневника П.К.Козлова. Стречно, 13 августа 1930 г.



«Хатка» Пржевальского в саду (в восстановленном виде) в имение Слобода.



Местность Гьяронг. Характерный пейзаж Восточного Тибета, столь восхищавшего своей природой Пржевальского, Роборовского и Козлова.

Фото Е.Ю.Харьковой

## Времена и люди **Феномен Пржевальского**

Пржевальскому посвящено множество изданий на русском и на некоторых иностранных языках: написано более десятка книг, лучшие из которых — это биографии, принадлежащие перу Н.Ф.Дубровина (1890), М.А.Энгельгардта (1891) и Ар.Н.Фатеева (1945). Дубровин\* — автор наиболее подробной, дискриптивной (с акцентом на фактологию) биографии путешественника, в то время как Энгельгардт и Фатеев (особенно последний) уделяют большое внимание психологии Пржевальского. Книга Фатеева, написанная с позиций социальной географии\*\*, позволяет проникнуть во внутренний мир исследователя, понять двигавшие им первичные импульсы.

Характеристика, данная Пржевальскому Фатеевым, определено позволяет говорить о *феномене Пржевальского* — феномене «путешественника по призванию». Отличительная черта таких путешественников — «органическое слияние решения их жизненной задачи и их профессии». Им свойственно «неискоренное чувство особо сложного характера, чувство обожания природы и самопожертвование существа, находящегося в передвижениях по разным неизвестным местам и восприятия в них явлений еще неизведанных и таинственных сил природы нашей земли» [7, с.17]. В жизни и деятельности Пржевальского Фатеев отмечает два главных факта: «синтетическое восприятие природы (субъективно) и собирание им громадного географического материала из неизведанных мест для методического его распознавания (объективно)» [7, с.2]. Пржевальский, утверждал Фатеев, — «человек внутреннего горения и восторженного общения с природой»; он постоянно находится «в состоянии страстного стремления к свиданию с природой» [7, с.16].

А вот какими словами характеризует Пржевальского Энгельгардт: «Самая выдающаяся черта в характере Пржевальского — любовь к страннической жизни. Он был закоренелым бродягой, для которого оседлая жизнь — каторга. Никакие опасности, труды, лишения не могли убить в нем охоты к путешествиям: напротив, она росла и развивалась, превращаясь в почти болезненную страсть. Он с ужасом думал о старости, которая

заставит его сидеть дома, и не раз выражал желание умереть в пустыне, в походе» [8, с.398].

«Путешественник по призванию», влюбленный в природу и готовый жертвовать собой; «закоренелый бродяга», которого с невыразимой силой манили азиатские просторы; страстный охотник и натуралист — таким рисуют нам Пржевальского его биографы Фатеев и Энгельгардт. Именно такой человек смог добыть в ходе своих многолетних экспедиций ценнейшие сведения для науки, стать первым исследователем природы Центральной Азии.

Другая характерная особенность Пржевальского — это его универсализм, проистекавший, по сути, из «синтетического» мировоззрения путешественника. Как отмечает зоолог Л.Я.Боркин, во второй половине XVIII в. в России сложился новый тип полевых исследователей, который получил название «универсальный странствующий натуралист». Этот тип «многогранного полевого исследователя» ярко проявился в знаменитых «физических» экспедициях Императорской академии наук (1786–1774) и стал «знаковой фигурой века Просвещения». Прослеживается он и на протяжении большей части XIX в. Как пишет Боркин, «натуралисты того времени нередко были “мастерами на все руки”, так как в ходе экспедиций, нередко весьма длительных, им приходилось фактически выполнять обязанности ботаника, зоолога, геолога, географа и т.д. Помимо описания природы и ландшафтов, они собирали



Памятник на могиле Пржевальского на берегу оз.Иссык-Куль, 1888. Распростерший крылья орел опирается лапами на карту Центральной Азии с маршрутами путешественника. На фасаде — копия именной медали Пржевальского.

\* Николай Федорович Дубровин (1837–1904) — историк, член Императорской академии наук с 1886 г., неперменный ее секретарь с 1893 г., генерал-лейтенант. Посвятил себя изучению главным образом военной истории, впервые дав на основании архивных материалов описание Отечественной войны 1812 года, Кавказской и Крымской войн. Был редактором журнала «Русская старина».

\*\* Социальная география в понимании Фатеева, в отличие от общей географии, изучает природу синтетически, как единое целое, проникнутое снизу доверху причинными связями; она объясняет соотношение человека и природы и выступает «своего рода натурфилософией нашего времени».

сведения о местных народах, их истории, обычаях и даже экономике» [16, с.56].

Таким образом, феномен Пржевальского соединяет в себе тот особенный синтетический взгляд на природу, о котором говорит Фатеев, и универсальный подход к собиранию и изучению нового эмпирического материала, относящегося к таким наукам, как физическая география, зоология, ботаника, геология, метеорология, этнография. Среди естественнонаучных изысканий на первом месте у Пржевальского стояла зоология, что легко объясняется его страстным увлечением охотой. Будет нелишним напомнить в связи с этим, что в 1881 г. Московский университет избрал путешественника почетным доктором зоологии. В ходе своих путешествий Пржевальский, охотник и природолюб, стал профессиональным зоологом, натуралистом — знатоком природы.

Пржевальский, природовед и природолюб, однако, не мог не испытывать беспокойства в связи с повсеместным наступлением человека на природу, примером чего была хищническая вырубка лесов — следствие развивающегося капитализма в России. Он также крайне негативно оценивал цивилизаторскую миссию Запада в отношении «диких» («нецивилизованных») народов Востока. *Веяние человека, — говорил он, — страшнее и истребительнее всяких невзгод природы! Ни холода и бури, ни скудный корм, ни разреженный воздух — ничто это далеко не может сравниться с тою роковою гибелью, которую несут для ди-*

*ких созданий прогрессивно возрастающая культура и так называемая цивилизация рода человеческого. Равновесие природы нарушается, искусство заменяет творчество...* [13, с.44]. В этих словах ученого вполне можно усмотреть зачатки зарождавшегося экологического мышления.

Предпринятая в этом очерке попытка взглянуть на Пржевальского под новым ракурсом и обрисовать его своеобразное синтетическое мировоззрение вскрывает те глубинные стимулы, которые двигали великим путешественником-первопроходцем. Это позволяет нам лучше понять особый духовный мир Пржевальского, его философию жизни, научные приоритеты, а также методику и саму систему полевых исследований, его стремление дать по возможности полную картину исследуемого региона, которая, по сути, есть картина Природы и человека в их неразрывной взаимосвязи.

И последнее, о чем хотелось бы сказать. Выступая на годовом собрании Императорской академии наук по случаю награждения Пржевальского Большой золотой именной медалью, непрменный секретарь академии К.С.Веселовский отметил: «Имя Пржевальского будет отныне синонимом бесстрашия и энергии в борьбе с природою и людьми и беззаветной преданности науке» [13, с.433]. Но, строго говоря, Пржевальский никогда не боролся с природой как таковой, а боролся лишь с теми трудностями и преградами, которые она нередко воздвигает на пути тех, кто стремится проникнуть в ее тайны и познать непознанное. ■

## Литература

1. Российские экспедиции в Центральную Азию: организация, полевые исследования, коллекции. 1870–1920-е годы / Ред. А.И.Андреев. СПб., 2013.
2. Гнатюк Т.Ю. Природоохранная деятельность П.К.Козлова: Аскания-Нова // Российское изучение Центральной Азии: исторические и современные аспекты (к 150-летию П.К.Козлова). СПб., 2014. С.32–44.
3. Пржевальский Н.М. Монголия и страна тангутов. Трехлетнее путешествие в Восточной Нагорной Азии. Т.1. СПб., 1875.
4. Пржевальский Н.М. Из Зайсана через Хами в Тибет и на верховья Желтой реки. СПб., 1883.
5. Роборовский В.И. Труды экспедиции Русского географического общества по Центральной Азии, совершенной в 1893–1895 годах под начальством В.И.Роборовского. Ч.1. СПб., 1900.
6. Козлов П.К. Монголия и Амдо и мертвый город Хара-Хото. М., 1948.
7. Фатеев Ар.Н. История одного призвания: путешественник Пржевальский. Прага, 1945.
8. Энгельгардт М.А. Колумб, Ливингстон, Стэнли, А.Гумбольдт, Пржевальский: Биографические повествования. Челябинск, 1995.
9. Пржевальский Н.М. Автобиографический рассказ // Известия ВГО. 1940. Т.72. №4–5. С.477–487.
10. Вальская Б.А. Неопубликованная рукопись Н.М.Пржевальского «О сущности жизни на Земле» // Доклады Восточной комиссии Г.О. СССР. Вып.4. Л., 1967. С.94–104.
11. Пржевальский Н.М. О сущности жизни на Земле // Доклады Восточной комиссии Г.О. СССР. Вып.4. Л., 1967. С.98–104.
12. Пржевальский Н.М. Воспоминания охотника // Известия ВГО. 1940. Т.72. №4–5. С.488–500.
13. Дубровин Н.Ф. Николай Михайлович Пржевальский: Биографический очерк. СПб., 1890.
14. Козлов П.К. Великий русский путешественник Н.М.Пржевальский // Природа и люди. Кн.11. (1928). Л., 1929. С.1–80.
15. Житомирский С.В. Исследователь Монголии и Тибета П.К.Козлов. М., 1989.
16. Боркин Л.Я. Натуралисты в контексте военно-географического изучения Центральной Азии // Творческое наследие Н.М.Пржевальского и современность: Материалы конф. «Четвертые междунар. науч. чтения памяти Н.М.Пржевальского». Смоленск, 2014. С.56–62.

# Новости науки

## Физика

### Исследование космических лучей в Антарктиде

В Научно-исследовательском институте ядерной физики им.Д.В.Скобельцына Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ) идет подготовка к серии экспериментов в рамках научного проекта «Сфера—Антарктида», направленного на изучение энергетического спектра и массового состава космических лучей в области сверхвысоких и предельно высоких ( $10^{17}$ – $10^{20}$  эВ) энергий, а также поиск локальных источников космических лучей в малоисследованной области южной небесной полусферы. В эксперименте также примут участие сотрудники Физического института им.П.Н.Лебедева РАН (Москва), Института ядерных исследований РАН (г.Троицк Московской обл.) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (Санкт-Петербург).

В полярную ночь установку «Сфера-А» поднимут с помощью специального аэростата на высоту 20–30 км над покрытой льдом и снегом Антарктидой. Устойчивые циркумполярные ветровые потоки обеспечат аэростату полет вокруг Южного по-

люса в течение месяца. В это время находящаяся на его борту установка будет регистрировать отраженный от снежной поверхности поток фотонов, названный по имени первооткрывателей излучением Вавилова—Черенкова (черенковским светом), а также флуоресцентный свет от широких атмосферных ливней (ШАЛ) — каскада вторичных частиц, рожденных в результате взаимодействия высокоэнергетических частиц из космоса с ядрами атомов воздуха. Изображение пятна черенковского света на снегу и трека ШАЛ будет проецироваться на мозаику фотоумножителей с помощью системы линз. Одновременная регистрация черенковского и флуоресцентного света, увеличивающая точность определения энергии и типа первичной частицы, будет реализована впервые в мире. Идею о возможности осуществления измерений, в которых регистрируются оба типа светового излучения, предложил в 1960–1970-х годах академик А.Е.Чудаков. Эти методики дают возможность анализировать структуру энергетического спектра и ядерный состав первичного космического излучения, а также обеспечивают большую (до 1000 км<sup>2</sup>) площадь регистрации.

В 1990-х годах исследования проводили на Тянь-Шане с применением установки «Сфера-1», которая стояла на горе и «осматривала» покрытую льдом и снегом поверхность Большого Алма-Атинского озера. Тогда удалось осуществить первые измерения энергетического спектра первичных космических лучей. Установка была оснащена сферическим зеркалом диаметром 1.2 м и мозаикой из 19 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), расположенной в фокусе зеркала.

В начале 2000-х годов для регистрации космических лучей специалисты НИИЯФ МГУ создали более совершенную установку «Сфера-2», оптическая система которой состояла из сферического зеркала диаметром 1.5 м с корректирующей диафрагмой и 109 ФЭУ, расположенных на фокальной поверхности зеркала. Электронная аппаратура позволяла записывать форму импульса с каждого из 109 ФЭУ с дискретностью 12.5 нс в течение 12 мкс. Кроме того, в новой установке появились датчики GPS, температуры и давления, инклинометр, который показывает угол наклона установки, электронный компас для ориентации комплекса, светодиодная система определения относительной чувствительности каждого ФЭУ детектора. Установка, поднятая с помощью при-

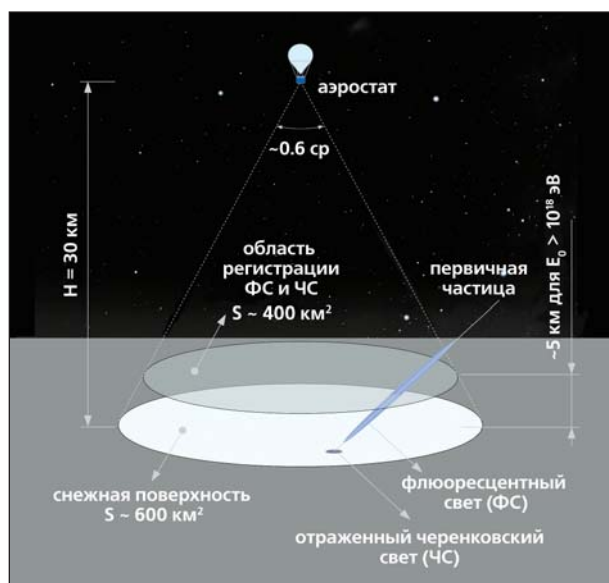


Схема эксперимента по регистрации космических лучей.



вязного аэростата на несколько сот метров над заснеженной поверхностью оз. Байкал, регистрировала отраженный от снега черенковский свет ШАЛ. Измерения проходили в 2008–2013 гг.

В Антарктиде, где имеются хорошие природные условия для проведения эксперимента по сбору данных об энергиях космических лучей (долгая полярная ночь, чистая атмосфера, устойчивые воздушные потоки), ученые будут использовать более сложную в техническом плане установку «Сфера-А». Ее усовершенствования связаны прежде всего с оптическим разрешением детектора и регистрирующей электроникой. Если в первой системе стояло 19 фотоэлектронных умножителей, то в проектируемой планируют установить более 3300 кремниевых фотоумножителей. Современное оборудование установки «Сфера-А» и новое программное обеспечение позволят с высокой точностью определить направление прихода широких атмосферных ливней и положение максимума развития ШАЛ, а также вычислять интеграл черенковского света и использовать его как меру энергии первичной частицы.

Кроме основных задач, в процессе эксперимента могут быть получены данные о потоках частиц низкой энергии, обусловленных изменениями солнечной активности, и сведения о возможных потоках радиоактивных частиц, связанных с авариями на атомных электростанциях и ядерными испытаниями.

© Антонов Р.А., Роганова Т.М.,  
доктора физико-математических наук,  
Чернов Д.В.,  
кандидат технических наук  
Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

## Астрономия

### «Радиоастрон» разглядел ядро галактики с рекордной детализацией

Российская наземно-космическая обсерватория «Радиоастрон» получила изображение активного ядра галактики в созвездии Ящерицы, объекта BL Lacertae, с рекордно высоким в истории астрономии угловым разрешением. Это позволит изучить детали происходящих там процессов.

BL Lacertae относят к блазарам — одним из самых высокоэнергетических объектов во Вселенной. Они характеризуются непрерывным спектром во всех диапазонах электромагнитного излучения (от гамма- до радио-) и способны сильно изменять свою светимость за короткие промежутки времени (от нескольких часов до нескольких суток). Обычно блазары связывают со сверхмассивными черными дырами в центре галактик.

BL Lacertae изначально считали переменной звездой, поэтому и дали объекту звездное имя. На самом деле это прототип блазаров, активное

ядро далекой галактики, обладающее исключительными свойствами. BL Lacertae окружен диском плазмы, разогретой до температур в миллиарды градусов Кельвина. Мощные магнитные поля и высокие температуры формируют так называемые джеты — релятивистские струи газа, которые движутся с околосветовыми скоростями. Теоретические модели предсказывали, что из-за вращения черной дыры и аккреционного диска линии магнитного поля должны формировать спиральные структуры, ускоряющие поток вещества в джетах. Долгое время у исследователей не было инструментов, чтобы заглянуть в эту область и понять механизм рождения джета. Сегодня такие инструменты есть. Один из них — «Радиоастрон».

Его создание было инициировано в конце 1970-х годов Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Еще в 1965 г. тогда сотрудник, а сегодня руководитель центра академик Н.С. Кардашев с коллегами предложил идею принципиально нового радиоинтерферометра с независимой регистрацией данных на нескольких антеннах, разнесенных на большие расстояния. Но развитие этого метода сдерживалось физическим барьером: телескопы нельзя было разнести на расстояние большее, чем диаметр Земли. Однако астрофизикам удалось преодолеть это ограничение. В 2011 г. с площадки космодрома Байконур поднялся аппарат «Спектр-Р», разработанный в НПО им. С.А. Лавочкина (г. Химки Московской обл.), на котором была установлена десятиметровая антенна, раскрывающаяся в космосе, комплекс научного оборудования, приемники, усилители и преобразователи сигналов. К наземной части исследований подключились телескопы в обсерваториях России, Австралии, Европы, США и Японии.

«Спектр-Р» вращается по необычной орбите, благодаря чему находящийся на нем радиотелескоп то приближается к Земле (на 50 тыс. км), то удаляется от нее примерно на 350 тыс. км. Это нужно, чтобы увеличить степень детализации изображений радиосветящихся объектов, определить их координаты и, возможно, динамику. Работа идет по следующей схеме: сигнальный луч с «Радиоастрономы» направляют в далекую точку Вселенной, туда же идет луч с наземного радиотелескопа. Отраженные сигналы принимают антенны, затем полученные данные сводят в общую картину. Благодаря разнесенной на огромное расстояние орбите спутника можно получать предельно четкие изображения — до 8 миллионов долей угловых секунд. Совместная работа космического аппарата и нескольких наземных радиотелескопов дает изображения космических объектов с разрешающей способностью в 30 раз большей, чем подобные наземные системы. К слову, такими возможностями не обладает даже самый известный в мире телескоп «Хаббл» (проект НАСА и Европейского космического агентства), выведенный на орбиту Земли в 1990 г.

В ходе наблюдений блазара BL Lacertae, проводившихся на самой короткой длине волны, доступной «Радиоастрону» (1.35 см, что соответствует частоте 22 ГГц), ученые добились рекордного углового разрешения за всю историю астрономических наблюдений: 21 мкс дуги (напомним, одна секунда дуги примерно соответствует углу, под которым виден футбольный мяч с расстояния 45 км). Если бы подобными характеристиками обладал оптический телескоп, в него можно было бы разглядеть спичечный коробок на поверхности Луны.

Радионаблюдения со сверхвысоким разрешением позволили увидеть сложную структуру джета, в которой идентифицированы отдельные компоненты, образующиеся при продвижении разогнанного до релятивистских скоростей вещества сквозь разреженную среду\*. Расположение и яркость этих компонентов совпадают с релятивистскими магнетогидродинамическими симуляциями, выполненными в Астрокосмическом центре ФИАН. Симуляции предсказывают возникновение в джетах так называемых реколламинационных шоковых волн (таких, которые распространяются в среде, но не «расползаются», сохраняя свою структуру). Судя по всему, эти шоковые волны действительно существуют в джетах. Изучение данных, полученных «Радиоастроном», — процесс длительный, так что в ближайшем будущем можно ждать появления новых публикаций.

По материалам Агентства научной информации «ФИАН-информ»

## Палеонтология

### Геохимический стресс как причина вымирания мамонтов

Серьезные научные дискуссии о причинах вымирания шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799) — ключевого вида континентальных позднплейстоценовых экосистем Северной Евразии — идут уже более века. Ученые выдвигают две основные гипотезы: антропогенную и климатическую. Аргументом в пользу первой служат обнаруженные мощные костеносные горизонты, образовавшиеся, по мнению ряда палеонтологов и особенно археологов, в результате активной охоты древнего человека. В качестве свидетельств приводятся скопления остатков мамонтов на знаменитых местонахождениях позднего палеолита в Костёнках, Юдинове (Россия), Дольни-Вестонице (Чехия) и др. Часть сторонников антропогенной версии отстаивает более мягкий вариант — вытеснение мамонтов на периферию континента во время активного расселения

человека, что объясняет наличие голоценовых рефугиумов на островах Берингии.

Большинство ученых, отвергающих гипотезу истребления мамонтовой фауны, склоняется к ведущей роли климата в этом процессе. Причиной они называют потепление и подъем уровня Мирового океана, что привело к затоплению шельфа и формированию сплошного пояса лесов. Негативными последствиями потепления могли быть увеличение глубины снежного покрова и зимние оттепели, приводящие к массовой гибели травоядных от голода. Несмотря на веские доводы, в данной концепции есть уязвимые моменты. Почему мамонты не мигрировали в благоприятные ландшафты северных или южных территорий? Как они пережили предыдущие теплые фазы, а на островах Северного Ледовитого и Тихого океанов выжили даже в климатический оптимум? Ответы на эти ключевые вопросы мог бы дать сценарий вымирания мегафауны от «гиперболезни», заключающийся в распространении инфекций через полорогих и хоботных. Однако слабое место в гипотезе пандемии — неоднозначная интерпретация костных патологий. В последние годы возрождается также космическая версия (падение метеорита или кометы), существуют и другие, но менее распространенные. Недостаток большинства из них — явный биотический уклон. По сути, все сводится к чрезмерному прессу вида *Homo sapiens*, недостатку пищевых ресурсов или пандемии, тогда как абиотический фактор рассматривается лишь в контексте климата и рельефа.

Палеонтологи Томского государственного университета предлагают оценивать проблему вымирания *M. primigenius* в тесной взаимосвязи с геохимической средой обитания вида. Ученые считают, что древних гигантов во многом погубило минеральное голодание, которое привело к геохимическому стрессу. Убедительное доказательство этому — массовое проявление остеодистрофии (патологического изменения костной и хрящевой тканей). Гипотеза опирается на результаты 15-летних



Крупнейшая из известных остеобластом локализована в проксимальном конце плечевой кости скелета таймырского мамонта.

Из фондов Зоологического института РАН

\* Gomez J. L., Lobanov A. P., Bruni G. et al. Probing the innermost regions of AGN jets and their magnetic fields with Radioastron. I. Imaging BL Lacertae at 21 microarcsecond resolution // The Astrophysical Journal. 2016. V.817. №2. Doi:10.3847/0004-637X/817/2/96.

исследований болезней скелетной системы *M. primigenius* и их сородичей\*.

Палеоэкологический анализ примерно 24 тыс. костей и зубов мамонтов Северной Евразии показал, что большинство поздних представителей вида *M. primigenius* имели остеопатологии. Деструктивные изменения чаще отмечаются на ребрах (иногда почти 100%), позвонках (до 90%), черепе (до 75%) и длинных костях (до 30–70%). При этом в отдельных коллекциях фиксируется очень высокая доля остеопороза (почти 100%).

Болезни скелетной системы часто развиваются в условиях дефицита в пище и воде жизненно необходимых химических макро- и микроэлементов. Минеральный голод в конце плейстоцена объясняется абиотическими факторами: резким неотектоническим подъемом обширных территорий и увлажнением макроклимата из-за начавшегося глобального потепления в позднеледниковье (примерно 17 тыс. лет назад). В результате приморские низменности были затоплены, а центральные территории — заболочены. Возвышенные равнины и предгорья подверглись сильному почвенному выщелачиванию из-за снижения уровня грунтовых вод и увеличения объема атмосферных осадков. Изменение среды обитания, связанное с кардинальной сменой благоприятных Ca-Mg-Na-ландшафтов на кислые и кислые глеевые, сопровождалось геохимическим стрессом. В этой ситуации лишь редкие зверовые солонцы (в иностранной литературе их обычно называют минеральными или солевыми лизунцами) оставались минеральными оазисами, где крупные травоядные могли употреблять горные породы, почву, поверхностные или грунтовые воды, богатые необходимыми макро- и микроэлементами. Такое поведение животных в научной среде называют литофагией (камнеедением) или геофагией — (землеедением). Очевидно, мамонты были самыми крупными литофагами в конце плейстоцена в Северной Евразии. Это также доказывается наличием минеральных веществ в желудочно-кишечном тракте трупов мамонтов и их копролитах, иногда достигающим 90% от массы содержимого.

Геохронологический рубеж 27–24 тыс. лет назад стал критическим для шерстистого мамонта. С этого момента представители вида начали испытывать хроническое минеральное голодание, которое отразилось в формировании мамонтовых «кладбищ» на зверовых солонцах. Дальнейшее ухудшение геохимической среды в позднеледниковье привело сначала к адаптивному сокращению размеров тела, а затем к окончательному вымиранию *M. primigenius*.

\* *Leshchbinskiy S.* Enzootic diseases and extinction of mammoths as a reflection of deep geochemical changes in ecosystems of Northern Eurasia // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2015. V.7. №3. P.297–317; *Лецинский С.В., Зенин В.Н., Бурканова Е.М. и др.* Комплексные исследования Барабинского мамонтового рефугиума в 2015 г. // *Вестник Томского государственного университета*. 2015. №400. С.54–365.



Остеобластома в проксимальном конце большой берцовой кости мамонта с Берелёхского кладбища (Якутия).

Из фондов Зоологического института РАН

*nus*. В голоцене зверовых солонцов уже было недостаточно для поддержания жизнеспособности разрозненных континентальных популяций.

© **Лецинский С.В.**,

кандидат геолого-минералогических наук  
Томский государственный университет

## Археология

### Поселения эпохи дзёмон

Институт археологии и этнографии СО РАН (г.Новосибирск) — пожалуй, единственный научный центр в России, специалисты которого ведут исследования археологических объектов Японского архипелага. Совместно с зарубежными коллегами, прежде всего из Университета Тохоку (г.Сендай), они изучают материалы древних поселений Страны восходящего солнца от Хоккайдо до Окинавы. Работа организована в рамках проекта Российского гуманитарного научного фонда «Поселенческие комплексы культуры дзёмон: особенности, эволюция, тихоокеанский контекст». Он посвящен актуальной и дискуссионной проблеме — возникновению и становлению оседлого образа жизни в древних культурах тихоокеанского бассейна. Объектом исследования стала культура дзёмон (13000–300 г. до н.э.), которая, согласно археологической периодизации истории стран Запада, соответствует мезолиту и неолиту. Следует отметить, что это первый в практике западной и японской археологии проект, охватывающий изучение поселенческих комплексов древней культуры на всем хронологическом периоде ее существования.

Термин «дзёмон» дословно означает «веревочный орнамент» — так называли распространенную в тот период технику украшения глиняной посуды и фигурок догу шнуrowым орнаментом. Японское слово было использовано для перевода словосочетания «cord marked pottery», которое в 1879 г. употребил при описании керамики со стоянки Омори вблизи Токио один из первых исследователей неолитической культуры Японии Э.Морс (США).



«Ритуальная башня» в Саннай-Маруяма.

В эпоху дзёмон жители Японского архипелага обитали в землянках и полуземлянках, имеющих в плане прямоугольную или круглую форму. Пол, стены — земляные, крыша из шкур животных, травы и валежника держалась на каркасе из деревянных столбов. Центром жилья был очаг земляного, кувшинного или каменного типа. В таком доме площадью примерно 20–30 м<sup>2</sup> обычно проживала одна семья от пяти человек. Здания бóльших размеров концентрировались главным образом в северной и центральной части Японии. Так, на стоянке Фудодо (префектура Тояма) археологи раскопали землянку, которая имела четыре очага и в плане напоминала эллипс размером 17×8 м. Землянку такой же формы (31×8.8 м) обнаружили на стоянке Сугисавадай (префектура Акита). Назначение этих построек неизвестно. Можно предположить, что они служили местом сборов населения для коллективной работы или выполняли функцию кладовых.

Уже на ранних этапах культуры дзёмон обитатели Японского архипелага стали образовывать поселения. Сначала они состояли из двух-трех землянок, но начиная со среднего периода дзёмон их количество в одном месте постепенно увеличивалось, что дало исследователям основание говорить о постепенном переходе людей к оседлому образу жизни. Жилища обычно строили на невысоких холмах примерно на одинаковом расстоянии вокруг площади, которая становилась общественным и религиозным центром. В историогра-

фической литературе такой тип организации поселения называют круглым или подковообразным. Среди традиционного жилья встречались также здания на подпорках прямоугольной, шестиугольной или эллипсообразной формы, не имевшие земляных стен и очага. Археологи затрудняются определить их назначение.

Восстанавливать постройки древнего периода японской культуры крайне сложно, потому что органические материалы, из которых они состояли, сохраняются плохо, и полная реконструкция — всегда отчасти гипотеза. Поэтому ученые воссоздают облик древних жилищ, используя информацию раскопок и музеев, с одной стороны, и привлекая опыт различных культур — с другой.

В северо-восточной Японии, где находится Университет Тохоку, с которым Институт археологии и этнографии СО РАН поддерживает прочные научные связи, есть несколько уникальных музеев-реконструкций. Наиболее известный и грандиозный по масштабу — ритуально-поселенческий комплекс Саннай-Маруяма (префектура Аомори) площадью 38 га, существовавший в период раннего (4-е тысячелетие до н.э.) и среднего (3-е тысячелетие до н.э.) дзёмона. Он расположен на горе Маруяма в 3 км от г.Аомори. По данным археологов, здесь проживало около 500 человек. Обитатели этой части Японского архипелага жили в полуземлянках средних размеров (до 12 м<sup>2</sup>). Но здесь же обнаружено несколько сооружений существенно большей площади. Одно из них, высотой примерно 20 м и шириной 10 м, явно не предназначалось для жилья. Вероятнее всего, его использовали в ритуальных целях во время проведения общинных праздников или мероприятий.

В поселенческом комплексе существовали и строения на шести опорных столбах, служившие, видимо, для общего сбора жителей и совместных работ. Поражает своими размерами «большой дом», длина которого 32 м, ширина — 10 м и высота — почти 15 м. Некоторые исследователи считают, что его могли использовать в качестве места поклонения, сторожевой башни или даже монумента. В наше время на территории комплекса проводят сезонные праздники, посвященные, например, дню осеннего равноденствия, во время которого ученые и волонтеры реконструируют древнейшие обряды. Подобные музеи можно найти и в центральной части Японии.

В 2016 г. сотрудники сектора зарубежной археологии института продолжают «археологическое турне» по ряду региональных научных центров, чтобы создать цельную картину древней истории японских островов.

**Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект №14-01-00017).**

© Соловьева Е.А.,

кандидат исторических наук  
Институт археологии и этнографии СО РАН  
г.Новосибирск

# В подтверждение вышесказанного?

академик РАН Д.В.Рундквист

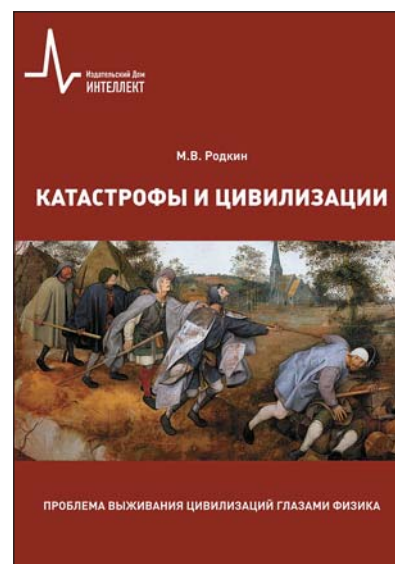
Государственный геологический музей им.В.И.Вернадского  
Москва

Рецензируемая книга, несмотря на свой небольшой объем, претендует на освещение многих ключевых вопросов развития и существования цивилизации. В первой главе автор дает статистику природных катастроф и величин ущерба от них. Развитие технологий приводит к тенденции уменьшения (по крайней мере) относительных потерь от природных катаклизмов, нормированных к численности населения и величине материальных ресурсов. Отсюда следует, что природные катастрофы, по-видимому, не могут служить фактором, принципиально ограничивающим развитие человечества, и их относительная роль имеет тенденцию к уменьшению. Во второй главе, в основном на примере проблемы прогноза землетрясений, дается краткий очерк истории развития исследований по прогнозу катастроф. Показана цикличность формирования методики прогноза, когда эпоха надежд на скорое его получение сменяется эпохой скепсиса и вновь эпохой надежды. В третьей главе на основе малоизвестных широко читателю сведений приводится обсуждение экологической истории великих цивилизаций прошлого. Закат этих цивилизаций часто оказывается тесно связанным с почти неизбежной (при традиционных формах хозяйствования) переэксплуатацией природных ресурсов.

В четвертой главе и далее история человечества рассматри-

вается с учетом принципиально нового феномена — научно-технической революции. Используется при этом не очень эстетичный, но хорошо запоминающийся образ — «модель суперхищника». В отличие от классического взаимодействия в системе типа «волки—зайцы», начиная с эпохи научно-технической революции исчерпание данного конкретного ресурса уже не ограничивает дальнейшее развитие. Дефицитный ресурс просто заменяется новым. Так, экологическая катастрофа Европы, обусловленная обезлесением (в связи с потреблением древесины для нараждавшейся промышленности), была снята переходом с древесного угля на каменный, а потом и на другие источники энергии. Экологический кризис эпохи научно-технической революции имеет не региональный, а глобальный характер, и связан он с исчерпанием мировых ресурсов. Подготовка кризиса выражается в лавинообразном росте загрязнения окружающей среды, исчерпании минеральных ресурсов, увеличении объемов отходов производства. Другое проявление возможного глобального кризиса — аномально быстрый рост населения планеты. Именно эти процессы и указывались во второй половине прошлого века Римским клубом и другими сообществами ученых как причины ожидаемого экологического кризиса.

Однако сценарий его развития уже не кажется столь неизбежным. За последние десятилетия кривые роста отходов, загрязнения окружающей среды



М.В.Родкин КАТАСТРОФЫ И ЦИВИЛИЗАЦИИ. ПРОБЛЕМА ВЫЖИВАНИЯ ЦИВИЛИЗАЦИЙ ГЛАЗАМИ ФИЗИКА.

*Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2016. 232 с.*

и численности населения все сильнее отклоняются от кризисного лавинообразного закона. И связано это не с началом активной фазы кризиса, а с развитием информатизации. Быстрый рост потребления материальных ресурсов заменяется намного более дешевым (в смысле потребности в ресурсах) ростом объема знаний и технологий.

Изложение автором перспектив развития человечества на данном этапе можно было бы считать вариантом сладкой постмодернистской утопии... если бы не его обсуждение парадокса Ферми (неожиданного отсутствия следов внеземных цивилизаций, которых, по всем оценкам, должно быть достаточно много). Это эмпирический факт, причем фундаментальный по своей важности, и ему следует дать объяснение. Родкин присоединяется к известной точке зрения о малой (сотни, не более тысячи лет) средней продолжительности существования технологических цивилизаций. В плане ранее изложенного автор наиболее вероятной причиной считает гибель человечества в результате глобального военного конфликта. Исходя из недавних экспертных заключений, он оценивает вероятность гибели человечества и существующей экосистемы Земли в результате ядерной войны и последующей ядерной зимы (при существовавшем на начало 2015 г. уровне напряженности) в ~99% за столетие. В случае реализации этого сценария следы деятельности человечества исчезнут с поверхности планеты примерно через миллион лет, и узнать о существующей здесь некогда цивилизации станет возможным только при тщательных раскопках.

В шестой и седьмой главах обсуждается адекватность отражения имеющейся угрозы в массовом сознании и исследуется базовая концепция современной военной доктрины — концепция гарантированного уничтожения в результате ответного удара. Ав-

тор приходит к выводу, что такое уничтожение отнюдь не гарантировано. Это вселяет и надежду (не весь ядерный арсенал будет использован), и беспокойство (уменьшение страха удара возмездия повышает соблазн нанесения первого удара).

В последней восьмой главе автор берется рассуждать о путях разрешения стоящих перед человечеством тактических и стратегических задач.

Книга Родкина написана по реалиям зимы—весны 2015 г. И, если ее тематика действительно актуальна, следовало бы ожидать, что за прошедшие полгода-год могли появиться новые сведения, существенным образом подкрепляющие или опровергающие рассуждения автора. И это действительно так: за небольшое время произошел ряд событий (как чисто научных, так и политических), имеющих непосредственное отношение к тематике книги. Рассмотрим наиболее существенные из них.

Рассуждения Родкина в связи с парадоксом Ферми можно кратко сформулировать следующим образом. Несмотря на отсутствие понимания в вопросе механизма возникновения жизни, существующие данные не дают веских оснований трактовать феномен жизни на Земле как уникальный. Аналогично, нет оснований и предполагать, что скорость биологической и социальной эволюции на других планетах будет протекать намного (на порядки величины) медленнее, чем на Земле. Только при этих дополнительных условиях факт необнаружения внеземных цивилизаций (парадокс Ферми) заставляет сделать вывод о малой средней продолжительности жизни технологических цивилизаций. Ключевой момент здесь — предположение о неуникальности феномена жизни.

Результаты миссии марсохода НАСА «Curiosity», опубликованные осенью 2015 г., не оставляют сомнений в существовании на Марсе в прошлом глубоких водо-

емов и рек и свидетельствуют в пользу вероятности существования там также и жизни. На вероятность ее существования независимо указывают выявленные при бурении марсианских горных пород следы органических веществ и всплески концентрации метана (также обнаруженные марсоходом «Curiosity»). Отметим, что наличие в прошлом на Марсе водоемов не только свидетельствует о существовании благоприятных для жизни условий, но как бы и указывает на стабилизирующую роль биоты, а значит, и на существование развитой экосистемы. Ведь для случая Земли именно биота обеспечивает современный тепловой баланс. Без ее регулирующей роли планета вся покрылась бы ледовым панцирем или разогрелась бы до уровня, сравнимого с Венерой. Не исключено, что под слоем грунта жизнь на Марсе продолжается и сейчас. Ученые НАСА исследуют гипотезы вероятной причины столь радикального изменения теплового режима планеты и гибели возможно некогда развитой экосистемы Марса. На 2020 г. запланирована специальная космическая миссия, которая должна ответить на эти вопросы. Однако уже сейчас видно, что полученные марсоходом «Curiosity» новые данные подкрепляют позицию автора книги, свидетельствуя как минимум в пользу не уникальности феномена жизни во Вселенной.

Предположительно наметился и кандидат на нарушение парадокса Ферми. В октябре 2015 г. было обнаружено, что космическая обсерватория «Кеплер» обнаружила в 1480 световых годах от Солнца нечто, весьма похожее на творение высокоразвитой внеземной цивилизации, а именно на гипотетическую сферу Дайсона. Были выявлены непонятные вариации яркости звезды КIC 8462852 в созвездии Лебедя, как если бы звезду окружали огромные солнечные батареи для улавливания ее энергии излучения. Подобное предполо-

жение высказывал физик и один из оригинальнейших мыслителей прошлого века — Фримен Дайсон. Альтернативная гипотеза о периодически затеняющих звезду облаках межзвездной материи, по-видимому, не подтверждается. В настоящее время разворачивается программа детального исследования звезды КIC 8462852. В этом открытии важно как обнаружение (предположительное пока, конечно!) развитой технологической внеземной цивилизации, так и ее удаленность от Земли на расстояние, в полтора раза превышающее толщину диска нашей Галактики. Подтверждение этого открытия весомо подкрепило бы один из основных выводов автора рецензируемой книги, что для выживания технологической цивилизации ей необходимо пройти через чрезвычайно «узкое горлышко», но также показало бы и то, что такое выживание возможно.

Отметим, что международные события за последние пол-

года, к сожалению, только усугубили опасения Родкина о высокой вероятности возникновения глобального ядерного катаклизма, возможно, и случайного.

Несмотря на общую тональность, книга «Катастрофы и цивилизации» отнюдь не напоминает некролог и во многих местах расцветается юмором и изящными пассажами (глава «Иллюзии и прозрения массового сознания»). Автор демонстрирует, что многие принципиально важные тенденции развития человечества оказываются впервые отраженными не в научных манускриптах, а в народном фольклоре. Развивая эту идею, уместно привести старый, чуть ли не середины прошлого века, анекдот. Встречаются в космосе две планеты: «Что-то ты милочка, неважно выглядишь? — Ой, представь, подцепила хомо сапиенс. — Милая, не горюй так, это ненадолго».

Естественно, есть и критические замечания. Прежде всего, огорчает некоторая «недоделан-

ность» столь важного и интересного издания. В тексте глав регулярно встречаются ссылки на литературу, список же ее не приводится. Отсутствуют и указания на источники иллюстраций, многие из которых подобраны с большим вкусом и в целом формируют образный ряд, параллельный более или менее строгому изложению автора и удачно дополняющий его рассуждения.

Я уверен, что у книги будет много оппонентов. И это нормально. Столь глубокие и животрепещущие проблемы требуют привлечения огромного и весьма разностороннего материала, результаты анализа которого редко бывают однозначны. Однако говорить о поднятых проблемах жизненно необходимо. Хотелось бы обратить на книгу внимание как широких масс читателей, так и VIP-персон, от чувства ответственности и благоразумия которых в решающей степени зависит, исполнится ли мрачный прогноз автора. ■

### Геология. Геофизика. Тектоника.

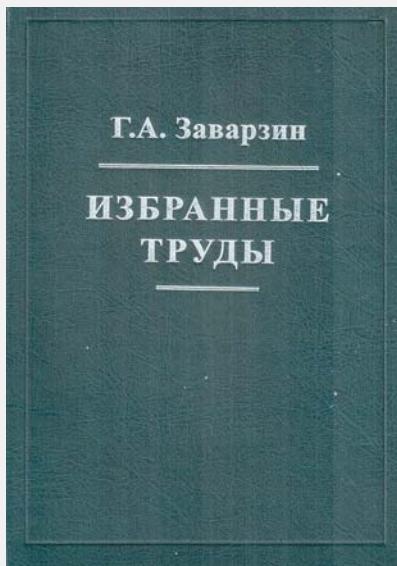
Е.Г.Мирлин, Л.В.Оганесян. Вихри в литосфере. М.: ВНИИгеосистем, 2015. 148 с.



Монография посвящена тем феноменам, возникновение которых напрямую связано с особенностями нелинейных природных систем, способных порождать высокоорганизованные структуры. Рассмотрен один из типов такого рода структур — вихревые — и, соответственно, движения вихревого типа в оболочках Земли, которые принято считать «твердыми». Подобные структуры широко распространены в атмосфере и гидросфере, в твердой же среде их формирование либо вовсе исключалось, либо рассматривалось как некоторый нетипичный и экзотический пример. Авторы на основе разнообразных и многочисленных данных и новых представлений о свойствах геосреды показывают роль движений вихревого типа в геодинамике и минерагении. Отдельная глава посвящена связи вихревого движения и траппового магматизма. Приведены примеры минерагенических особенностей вихреподобных структур разного ранга в океанах и на континентах. Развиваемые представления дополняют теорию тектоники плит, которая, по мнению авторов, справедлива как первое приближение, описывающее движение плит и процессы, происходящие на их границах, в той мере, в какой справедливо представление о литосфере как о твердом, совершенно инертном монолите. В перемещении плит всегда присутствует вихревая компонента, определяющая динамику литосферы.

**Микробиология. История науки**

**Г.А.Заварзин.** Избранные труды / Редколлегия: Н.Н.Колотилова, Т.Н.Жилина, Н.В.Пименов;  
Предисловие А.В.Пиневиц. М.: МАКС Пресс, 2015. 512 с.



Этот сборник трудов крупнейшего современного естествоиспытателя, классика микробиологии Георгия Александровича Заварзина (1933–2011) можно было бы назвать малым собранием сочинений, которое стало первой попыткой собрать воедино работы автора, чтобы показать широту его научного поиска и глубину обобщений. Научное наследие Заварзина обширно, разнообразно и востребовано учеными многих специальностей. Тщательно отобранные редколлгией естественнонаучные работы разных лет отражают основные направления деятельности ученого. Статьи собраны в семь разделов с хронологическим порядком внутри каждого: история изучения биоразнообразия микробов, русская микробиологическая школа; систематика и филогения прокариотных организмов; распространение и численность микробов; биогеохимическая деятельность микроорганизмов; микробные сообщества; эволюция биосферы; глобальные темы микробиологии. Центральный тезис представленных статей состоит в том, что на протяжении всей геологической истории микробные сообщества так или иначе участвовали в формировании атмосферы, литосферы и гидросферы. Завершает книгу наиболее полный список публикаций автора. Отметим, что многие статьи, вошедшие в сборник, стали библиографической редкостью, и потому их издание сегодня так важно.

**Зоология**

**С.Д.Степаньянц, В.В.Хлебович, В.Р.Алексеев и др.** ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ РЫБ И БЕСПОЗВОНОЧНЫХ КАСПИЙСКОГО МОРЯ. Т.2: СТРЕКАЮЩИЕ, ГРЕБНЕВИКИ, МНОГОЩЕТИНКОВЫЕ ЧЕРВИ, ВЕСЛОНОГИЕ РАКООБРАЗНЫЕ И МИЗИДЫ. СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 244 с.

Каспийское море — высокопродуктивный водоем, который сочетает черты континентального и морского и имеет богатую геологическую историю. Море играет первостепенную роль в формировании инфраструктуры прибрежных районов пяти прикаспийских государств. Из всего разнообразия видов животных, населяющих данный бассейн, во втором томе определителя описываются в первую очередь те, которые могут рассматриваться как часть биологических ресурсов. Но не упущены и другие таксоны, подлежащие рациональному использованию и охране, так как они связаны с ресурсными видами через трофические и топические взаимоотношения и формируют качество среды обитания или влияют на биосферный баланс в целом, обеспечивая стабильное существование экосистем. Уделено внимание также и видам, имеющим эстетическое, культурное или научно-практическое значение. В томе приведены подробно иллюстрированные определительные таблицы всех родов и видов стрекающих, гребневиков, многощетинковых червей, веслоногих ракообразных и мизид Каспийского моря. Таблицы сопровождаются необходимой информацией по таксономии, морфологии и распространению семейств, родов и видов, а также обзором их промыслового или ресурсного значения и роли в экосистеме.





## Ботаника

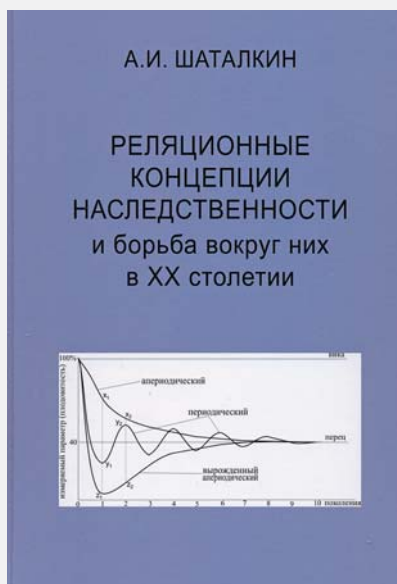
**А.С.Зернов, Ю.Е.Алексеев, В.Г.Онипченко.** ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 459 с.

Это первое в истории изучения флоры Карачаево-Черкесской Республики специализированное пособие по определению видов сосудистых растений. Издание основано как на многолетних полевых исследованиях авторов, так и на критическом изучении гербарных материалов и литературных источников. Приведены сведения о распространении и фитоценотической приуроченности всех видов аборигенной флоры и адвентиков (т.е. пришлых, заносных видов, внедрившихся в естественные сообщества), выявленных на момент издания. Из культивируемых видов учтены далеко не все, а прежде всего наиболее распространенные, занимающие заметное место в сельскохозяйственном производстве или в озеленении. Семейства и роды расположены в «Определителе» по системе А.Энглера, в редакции, принятой во «Флоре СССР» (1934—1964). Исключение составляет семейство Gramineae, для которого принята система Н.Н.Цвелёва (1976). Но объем некоторых таксонов дан в несколько измененном виде (например, в состав семейства Ericaceae включены Monotropaceae и Pyrolaceae). Одноходовые определительные ключи построены по традиционному дихотомическому принципу. Для максимального облегчения определения видов большинство растений показано на цветных фотографиях и лишь некоторые — на рисунках.



## Генетика. История науки

**А.И.Шаталкин.** РЕЛЯЦИОННЫЕ КОНЦЕПЦИИ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ И БОРЬБА ВОКРУГ НИХ В XX СТОЛЕТИИ. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 433 с.



Автор — энтомолог, известный специалист в области биологической номенклатуры и таксономии — предлагает рассматривать «наиболее общие законы природы», декларированные Т.Д.Лысенко, как оригинальную теорию реляционной (т.е. аналоговой, а не матричной, термин введен автором) наследственности: воспроизведение у родителей и их потомков сходной системы жизнеобеспечивающих отношений и обусловленных ими эмерджентных свойств (т.е. особых свойств системы, не присущих ее элементам). В первой части книги рассматривается концепция наследственности в ламаркизме и мичуринской биологии, которую автор ставит в один ряд с трудами И.И.Шмальгаузена и эпигенетикой К.Уоддингтона. Вторая часть носит конспирологический характер. Конфликт двух советских школ — классической генетики и мичуринской биологии, обернувшийся запретом первой, оказывается, не был связан с научными расхождениями. По мнению автора, «...Т.Д.Лысенко поддерживало правительство, а генетиков партаппарат, т.е. идеологи. Сессия ВАСХНИЛ 1948 г. явилась результатом поражения идеологов в их войне за власть со строителями [социализма]. С приходом к власти Н.С.Хрущева партаппарат взял реванш. Итог известен. СССР, ведомый идеологами, оказался в конце концов экономическим банкротом». Явное достоинство книги — автор не подчеркивает национальность оппонентов Лысенко и не утверждает, что во всем виноваты евреи.

# Правила для авторов

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

ся и проходят редакционную подготовку.

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

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

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

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

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

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

## ПРИРОДА

Ответственный секретарь  
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Научные редакторы  
**О.О.АСТАХОВА**

**М.Б.БУРЗИН**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

**М.Е.ХАЛИЗЕВА**

**О.И.ШУТОВА**

**А.О.ЯКИМЕНКО**

Литературный редактор  
**Е.Е.ЖУКОВА**

Художественный редактор  
**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией  
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Перевод:  
**С.В.ЧУДОВ**

Графика, верстка:  
**С.В.УСКОВ**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

Учредитель:  
Президиум Российской академии наук

Издатель: ФГУП «Академиздатцентр «Наука»  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

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

Подписано в печать 17.03.2016  
Формат 60×88 1/8  
Бумага офсетная. Офсетная печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Тираж 366 экз.  
Заказ 69  
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Академиздатцентр «Наука»,  
(типография «Наука»)  
121099, Москва, Шубинский пер., 6

[www.ras.ru/publishing/nature.aspx](http://www.ras.ru/publishing/nature.aspx)

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



Для непосвященных дождевые черви выглядят одинаково. Отсутствие у них ярких внешних отличий осложняет и работу зоологам, занимающимся систематикой этих животных. Считается, что на территории России обитает около 50 видов дождевых червей, а на всей равнинной части Сибири и в северных горах (от Урала до Чукотки) — всего 16 видов. Многие из них ведут оседлый образ жизни, в том числе из-за того, что полоска непригодной для них почвы становится непреодолимым препятствием. Барьеры, разделяющие популяции, создают условия для видообразования. Естественно было предположить, что в пределах одного вида, занимающего обширный ареал, могли возникнуть значительные генетические различия. И эти надежды оправдались: в результате исследований методом ДНК-штрихкодирования 259 особей дождевых червей из 12 географических точек юга Западной Сибири было обнаружено 27 генетических кластеров, 17 из которых оказались новыми, не имеющими сходства с известными видами. Новые виды, возможно, выявлены в Предуралье и на северо-востоке Азии. Проведенная работа не только подтверждает предположения о высокой криптической изменчивости дождевых червей Сибири, но и свидетельствует о том, что значительная часть их разнообразия еще не охарактеризована.

**Берман Д.И., Шеховцов С.В., Пельтек С.Е.**

ВИДИМО-НЕВИДИМОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ СИБИРИ

