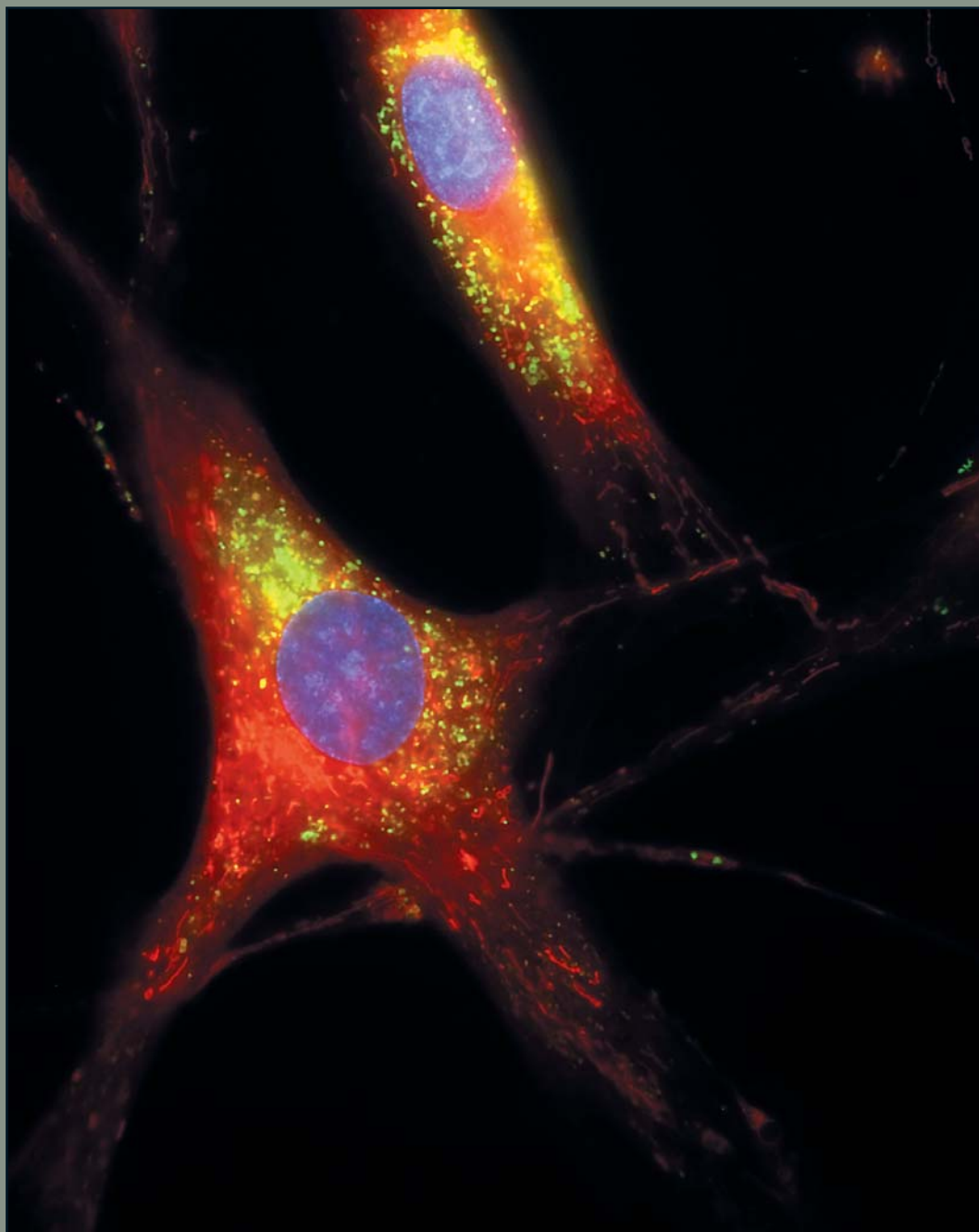


ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

1 17



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.Батурин**, 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.Кунин** (**E. Koonin**, США), 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 **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор физических наук **В.П.Шибаев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Культура первичных фибробластов человека при стандартных условиях инкубации. Аутофагосомы и митохондрии в клетках окрашены с помощью красителей — Cyto-ID (зеленая флуоресценция) и Mitotracker Red (красная флуоресценция) соответственно. За исследование механизмов аутофагии присуждена Нобелевская премия по физиологии или медицине 2016 г. японскому ученому Ё.Осуми.

См. в номере: *Лауреаты Нобелевской премии 2016 года.*

Фото К.Г.Лямзаева

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Кальцитовое убранство пещеры Кизил-Коба. См. в номере: **Комаров В.Н., Панова А.В.** *Урочище Кизил-Коба — жемчужина Горного Крыма.*

Фото А.В.Пановой



«Наука»

**В НОМЕРЕ:****3 М.А.Иванов**  
**Океан на Марсе:  
миф или реальность?**

В конце 80-х годов XX в. после детального фотогеологического анализа снимков поверхности Марса американские геологи выдвинули смелую гипотезу о существовании на нем океана, когда-то заполнявшего северные низины. Как развивалась эта гипотеза в течение почти 30 лет исследований Красной планеты?

**14 А.А.Киселев, И.Л.Кароль**  
**Поможет ли климату  
парижское «лекарство»?**

В декабре 2015 г. подписано Парижское соглашение по климату. Согласно его условиям, нужно добиться, чтобы рост глобальной температуры не превышал 2°C. Какие же обязательства по сокращению эмиссии парниковых газов взяли на себя крупнейшие страны? Почему выводы специалистов оказались столь неоднозначными? И, наконец, в чем отличия основных положений нового соглашения от его предшественника — Киотского протокола?

**22 А.Н.Суворов**  
**Микробиота пожилых:  
истoki долголетия**

Установлено, что микробное разнообразие человека с возрастом снижается. Любые нарушения в сложившихся взаимоотношениях между организмом и его микробиотой вызывают дисбиоз, на фоне которого развиваются тяжелые патологии, в том числе атеросклероз, диабет, аутоиммунные, нейродегенеративные и онкологические заболевания. Понятно, что своевременная борьба с дисбиозом — важное условие улучшения качества жизни и долголетия.

**30 Р.К.Расцветаева, Н.В.Щипалкина,  
С.М.Аксенов**  
**С Луны на Землю:  
новые данные о пироксеноидах**

Коллекция лунных образцов, хранящаяся в центре космических полетов в Хьюстоне, изучена лишь частично. Новые исследования лунных минералов и их сравнение с земными могут быть полезны для познания геологических процессов, происходивших как на Земле, так и на ее спутнике.

**Научные сообщения****39 П.Л.Старокадомский**  
**Развитие редкой болезни:  
ДНК-полимераза  
как регулятор иммунитета****В.Р.Алифанов, А.А.Грабовский**  
**Гигантская морская ящерица  
со склона Золотого хребта  
на Чукотке (43)****Е.В.Трофимова**  
**Удивительный карст  
в долине реки Синей (48)****Н.В.Лопатин**  
**Стены и башни  
древнего Изборска (55)****Заметки и наблюдения****60 В.Н.Комаров, А.В.Панова**  
**Урочище Кизил-Коба —  
жемчужина Горного Крыма****67 ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ  
2016 ГОДА****В.П.Минеев**  
**По физике — Д.Таулесс, Д.Холдейн,  
М.Костерлиц (67)****С.З.Вацадзе**  
**По химии — Ж.-П.Соваж,  
Ф.Стоддарт, Б.Феринга (71)****В.А.Поспелов**  
**По физиологии или медицине —  
Ё.Осуми (77)****82 Новости науки**

Открытие далекого рентгеновского квазара. Г.А.Хорунжев, Р.А.Буренин, М.В.Еселевич, С.Ю.Сазонов (82). Германий в решетке алмаза. Ю.Н.Пальянов (83). В урочище Волчья Грива обнаружена самая высокая в Азии концентрация костей мамонтов. С.В.Лещинский (85). Первые на Шелковом пути. А.А.Аношкин (87).

**Рецензии****89 В.И.Приходько**  
**Причастны ли охотники  
к сокращению биоразнообразия?  
(на книгу: А.А.Данилкин. Охота,  
охотничье хозяйство и биоразнообразие)****93 Новые книги**

## CONTENTS:

- 3 M.A.Ivanov**  
**Ocean on Mars: Myth or Reality?**  
*In the late 1980s after detailed photogeologic analysis of Mars surface images american geologists suggested a bold hypothesis: there was an ocean sometime that filled northern lowlands. How has this hypothesis evolved during almost 30 years of Red Planet investigation?*

- 14 A.A.Kiselev, I.L.Karol**  
**Will Parisian «Remedy» Help the Climate?**  
*Paris Agreement on climate was signed in December 2015. Under the terms of this agreement it's necessary to reach no more than 2°C global temperature rise. So what are the commitments of biggest countries to reduce greenhouse gases emission? Why did expert conclusions turn out to be so ambiguous? And finally, what are the differences between conceptual issues of this new agreement and the previous one, namely Kyoto Protocol?*

- 22 A.N.Suvorov**  
**Microbiota of Elderly People: Origin of Longevity**  
*It was established that microbial diversity in human declines with age. Any disturbances in the existing inter-relationships between the organism and its microbiota induce dysbiosis associated with serious pathologies, which include atherosclerosis, diabetes and autoimmune, neurodegenerative, oncological diseases. It is clear that well-timed control of dysbiosis is an important factor of life quality and longevity improvement.*

- 30 R.K.Rastsvetaeva, N.V.Shchipalkina, S.M.Aksenov**  
**From Moon to Earth: New Data on Pyroxenoids**  
*Collection of lunar samples at Space Center Houston is only partly explored. New examinations of moon minerals and their comparison with earth ones may help to understand geological processes, which have taken place both on Earth and on its satellite.*

## Scientific Communications

- 39 P.L.Starokadomskyy**  
**Development of Rare Disease: DNA-polymerase as Immune Regulator**  
**V.R.Alifanov, A.A.Grabovsky**  
**Giant Sea Lizard from the Slope of Golden Ridge in Chukotka (43)**  
**E.V.Trofimova**  
**Marvellous Karst in the Valley of Sinjaya River (48)**  
**N.V.Lopatin**  
**Walls and Towers of Ancient Izborsk (55)**

## Notes and Observations

- 60 V.N.Komarov, A.V.Panova**  
**Kizil-Koba Tract – the Pearl of Crimean Mountains**

- 67 2016 NOBEL PRIZE WINNERS**  
**V.P.Mineev**  
**In Physics: D.Thouless, D.Haldane, M.Kosterlitz (67)**  
**Vatsadze S.Z.**  
**In Chemistry: J.-P.Sauvage, F.Stoddart, B.Feringa (71)**  
**Pospelov V.A.**  
**In Physiology or Medicine: Y.Ohsumi (77)**

- 82 Science News**  
 Discovery of Distant X-ray Quasar. **G.A.Khorunzhev, R.A.Burenin, M.V.Eselevich, S.Y.Sazonov (82)**. Germanium in Diamond Lattice. **Yu.N.Palyanov (83)**. The Largest Mammoth Burial Site in Asia Discovered in Wolf Mane Tract. **S.V.Leschinski (85)**. The First on the Silk Road. **A.A.Anoikin (87)**.

## Book Reviews

- 89 V.I.Prikhodko**  
**Are Hunters Implicated in Biodiversity Reduction?**  
 (A.A.Danilkin. Hunt, Game Husbandry and Biodiversity)

- 93 New books**

# Океан на Марсе: миф или реальность?

М.А.Иванов

**Т**ри исследователя внесли наиболее заметный вклад в ранние телескопические наблюдения Марса.

Астроном Дж.Скиапарелли (1835–1910) в 1877 г. составил первую карту пространственного распределения альбедных деталей поверхности Марса. Среди них отмечались загадочные, темные и протяженные образования. Телескопические наблюдения Марса в этот ранний период исследований имели низкое пространственное разрешение и позволяли различать на поверхности планеты детали поперечником не менее сотен километров. Открытие Скиапарелли почти совпало по времени с завершением строительства Суэцкого канала в 1869 г. Возможно, такое совпадение повлияло на интерпретацию деталей поверхности, и ученый выдвинул гипотезу искусственного происхождения темных деталей, назвав их каналами, которые прорыли, естественно, марсиане.

Эту гипотезу подхватил и довел до абсурда американский предприниматель и астроном-любитель П.Лоуэлл (1855–1916). На заре XX в. (1906 и 1908 гг.) он опубликовал две книги, в которых привел новую, полностью спекулятивную, карту геометрически правильной сети каналов и однозначно утверждал, что каналы Марса имеют искусственное происхождение и созданы высоко развитой марсианской цивилизацией. Идея обитаемости Марса, и не просто обитаемости, а именно существования на нем технологической цивилизации, была настолько популярна, что в начале 20-го столетия мало кто сомневался в скором установлении контакта с ней. Мрачной иллюстрацией этих ожиданий послужил знаменитый роман Г.Уэллса «Война миров».



**Михаил Арсеньевич Иванов**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — геология, планетная геология, космохимия.

**Ключевые слова:** Марс, океан, грязевой вулканизм, ударные выбросы.  
**Key words:** Mars, ocean, mud volcanism, impact ejecta.

Серьезные ученые, однако, продолжали непредвзятое исследование планеты, и один из них — Э.Антониади (1870–1944) — опубликовал в 1909 г. еще одну карту Марса, на которой, естественно, не было каналов — главного доказательства существования разумной жизни. Наблюдения Антониади и других исследователей разрушили гипотезу о марсианской цивилизации. Тем не менее возможность обитаемости Красной планеты остается реальностью, так как Марс — единственная из планет земной группы (за исключением, разумеется, Земли), где условия, хотя и суровые, теоретически допускают существования жизни. Эта идея — основной стержень современных исследований Марса.

## История исследований Марса межпланетными экспедициями

С началом космической эры и осуществлением дальних межпланетных экспедиций появилась возможность систематически изучать поверхность Марса с высоким пространственным разрешением. Одной из мотиваций первой экспедиции серии Mariner к этой планете в 60-х годах про-

© Иванов М.А., 2017



шлого века стал поиск возможных следов вымершей цивилизации. А вдруг? Ведь разрешения телескопической съемки было явно недостаточно для обнаружения таких следов.

Изображения, переданные аппаратами миссии Mariner и покрывавшие далеко не всю поверхность, показали, что она в основном кратерирована и в какой-то степени напоминает лунную. Следов цивилизации на снимках не было, зато были формы рельефа, которые могли указывать на деятельность воды далеко за пределами полярных шапок как в настоящее время, так и в геологическом прошлом. Это стало открытием колоссальной научной важности, ибо вода — необходимое условие существования жизни, какой мы ее знаем на Земле.

В 1975 г. была реализована одна из наиболее удачных экспедиций к Марсу — Viking. В ее состав входили орбитальные и спускаемые аппараты. Первые покрыли съемкой высокого пространственного разрешения (номинальное разрешение — около 200 м/пкс, но были и снимки с разрешением несколько метров) практически всю поверхность планеты. Переданные изображения показали наличие на поверхности форм рельефа, связанных с вулканической, тектонической и ветровой деятельностью, и полное отсутствие несомненных техногенных форм.

Один из важнейших результатов съемки — установление того, что водные и, возможно, ледниковые процессы очень широко распространены на поверхности планеты. Было подтверждено, что снимки миссии Mariner с водными формами рельефа показали не что-то экзотическое, а обычные образования марсианской поверхности. Кроме того, размеры структур водно-ледникового происхождения (до тысяч километров в длину) указывали на то, что вода на Марсе не просто есть, а ее много.

Спускаемые аппараты серии Viking передали панорамы поверхности Марса (на удивление похожие) в двух удаленных друг от друга точках, провели измерения химического состава грунта и выполнили комплекс метеорологических наблюдений. Одним из главных экспериментов на спускаемых аппаратах стал поиск следов жизни (хотя бы микроорганизмов) с помощью химико-биологических исследований. Положительных результатов эти эксперименты не дали.

Настоящий расцвет в исследованиях Марса наступил после 1996 г., когда группа ученых под руководством Д.Мак-Коя опубликовала статью о находке в одном из марсианских метеоритов (ALH 84001) образований, напоминающих бактерии. Это возродило идею обитаемости Марса, угасшую после получения данных экспедиции Viking. Мнения о природе объектов, найденных Мак-Коем и его коллегами, разделились. Кто-то считал их доказательством обитаемости Марса хотя бы в далеком прошлом (возраст метеорита

оценивается в 4.5 млрд лет), кто-то считал их минеральными объектами абиогенного происхождения. Позднее в одном из лунных метеоритов обнаружили образования, похожие на те, что сделали уникальным марсианский метеорит. Как бы то ни было, объекты, найденные в ALH 84001, спровоцировали усиленный интерес к исследованиям Марса как с орбиты, так и на поверхности.

В июле 1997 г. на Красной планете заработал первый марсоход — Pathfinder, который провел серию определений химического состава грунта и передал на Землю панорамы поверхности Марса [1]. Результаты, полученные марсоходом, позволили предположить наличие андезитового вулканического материала, неизвестного ранее за пределами Земли.

В сентябре того же года на орбиту вышел аппарат Mars Global Surveyor с комплексом приборов на борту, которые провели очень точные замеры высоты поверхности и получили ее изображения в видимом (с разрешением в несколько метров) и инфракрасном диапазонах. Результаты экспедиции позволили составить точную глобальную карту рельефа Марса и приступить к фотогеологическому анализу поверхности с высокой степенью детальности.

В октябре 2001 г. на орбите Марса появился спутник Odyssey с детекторами гамма- и нейтронного излучения, а также с системой получения изображений в тепловом и видимом диапазонах. Детектор нейтронов выдал результат фундаментальной важности: впервые было получено практически прямое доказательство наличия большого количества (до 50 вес.% в высоких широтах) воды на Марсе, о присутствии которой ранее можно было только догадываться, опираясь на интерпретацию особых форм рельефа.

В декабре 2003 г. на орбиту вышел космический аппарат Mars Express, оборудованный камерой высокого разрешения, набором спектрометров и длинноволновым радаром. Камера позволила проводить детальный (с разрешением в несколько десятков метров) фотогеологический анализ в обширных регионах. С помощью спектрометров впервые было установлено наличие глины на поверхности Марса, что свидетельствовало о существовании там химического выветривания. Радарная система помогла увидеть в разрезе верхнюю часть коры Марса и, в частности, проследить подошву полярных шапок.

В январе 2004 г. началась эпопея двух марсоходов — Spirit и Opportunity. Первый опустился на дно кратера Гусев, где, по морфологическим данным, предполагалось наличие озерных отложений. Но они не были обнаружены. Opportunity начал свою работу в регионе, где не ожидалось найти отложения, связанные с водной деятельностью. Однако марсоход передал изображения и проанализировал мощные толщи осадочных пород водного происхождения.

С 25 мая по 2 ноября 2008 г. в северной полярной области Марса работал стационарный спускаемый аппарат Fenics, основной задачей которого были детальное исследование свойств грунта и наблюдения за условиями на поверхности. Конечная цель этой экспедиции — оценка пригодности приполярных областей Марса для жизни микроорганизмов. Однозначный ответ на этот вопрос так и не получили. Главным же результатом миссии стало обнаружение льда воды у самой поверхности, что полностью согласуется с результатами нейтронного детектора на аппарате Mars Odyssey.

В марте 2006 г. на орбиту вышел аппарат Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), на борту которого была установлена камера, позволяющая видеть поверхность планеты с пространственным разрешением 25–30 см. Такое разрешение практически приближает фотогеологические наблюдения с орбиты к полевым. Кроме того, на аппарате стоят высокоточные спектрометры, которые дают возможность характеризовать минеральный состав поверхности в точной увязке с геологическими объектами. Данные экспедиции MRO показали широкое распространение на поверхности Марса минералов (например, филлосиликатов), образующихся при непосредственном участии воды.

Таким образом, наличие воды на Марсе — точно установленный научный факт. Современные условия на Марсе (среднегодовая температура примерно  $-50^{\circ}\text{C}$  и атмосферное давление 6 мбар), однако, резко ограничивают возможность существования жидкой воды на его поверхности. Скорее всего, наблюдаемые формы рельефа и водные минералы образовались в другие эпохи. В какие? Как менялась деятельность воды с течением времени? Эти вопросы имеют фундаментальное научное значение, так как связаны с изменениями климата Марса и его потенциальной обитаемостью.

Среди разнообразных водно-ледниковых форм рельефа наиболее впечатляющие так называемые каналы истечения (рис.1). Это каньоны глубины несколько километров, ширины десятки и сотни, а длиной — тысячи километров. Для формирования таких структур необходимо количество воды, измеряемое миллионами кубических километров. Какова судьба воды, прорезавшей такие каналы? Где она накапливалась и накапливалась ли вообще или просачивалась в грунт и захоронялась в подповерхностных слоях?

Каналы истечения — крупные формы рельефа, и их на поверхности Марса немного. Самая большая система каналов расположена в северном полушарии и открывается в древний ударный бассейн — равнину Хриса, которая, в свою очередь, представляет собой «залив» обширной северной равнины (см. рис.1). Следовательно, если из каналов истечения выносилось большое количество воды, то в конечном итоге она должна накапливаться (или не накапливаться?) в пределах северных равнин.

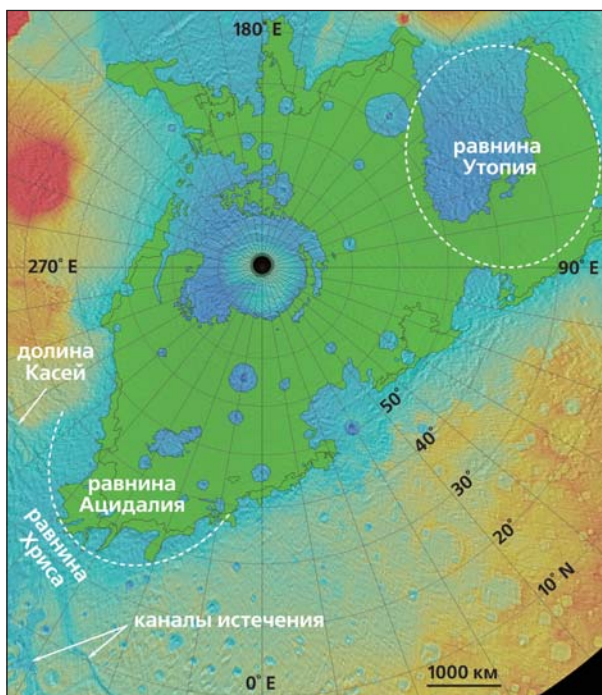
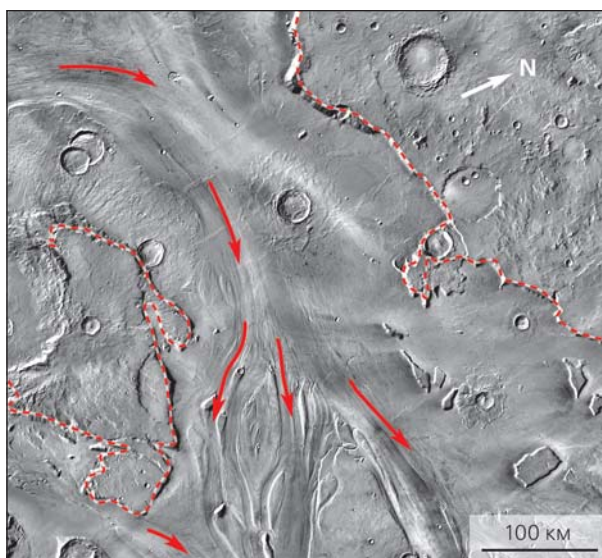


Рис.1. Мозаика снимков спектрометра THEMIS (Thermal Emission Imaging System), установленного на космическом аппарате Mars Odyssey. Тепловая съемка в дневное время марсианских суток. Вверху — канал истечения (долина Касей), открывающийся в равнину Хриса (за нижним краем снимка). Стрелки показывают направление течения воды. Пунктирные линии отмечают край берегового уступа каньона. Внизу — топографическая карта MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), наложенная на мозаику снимков THEMIS. Холодные тона — понижения рельефа, теплые — повышения, красные пятна в верхнем левом углу — вулканы Патера Альба и Олимп. Пунктиром отмечены примерные границы равнин Утопии и Ацидалии. Ацидалия расположена у равнины Хриса, куда открываются крупнейшие на Марсе каналы истечения. Зеленым показана формация Ваститас Бореалис [2].  
Здесь и далее фото НАСА ([pds.jpl.nasa.gov](http://pds.jpl.nasa.gov))



## Северный океан Марса: гипотеза

Фотогеологический анализ снимков, переданных орбитальными аппаратами Viking, позволил установить двучленное строение поверхности Марса — ее морфологическую дихотомию. Поверхность планеты складывается из сильно кратерированного и высоко стоящего южного материка и слабо кратерированной северной равнины, которая располагалась на низких топографических уровнях. Во многих местах эти два главных типа местности Марса разделены пологим региональным уступом высотой в сотни метров — дихотомической границей. При детальном анализе снимков одного из ее участков американский геолог Т.Паркер и его коллеги [3, 4] заметили, что к уступу со стороны северных равнин примыкает местность с необычной лопастевидной границей (рис.2). Лопасти достигали в ширину нескольких десятков километров, имели низкий фронтальный уступ и огибали локальные препятствия, как бы частично подтапливая их. Морфология границы убедительно свидетельствовала о том, что материал, ею оконтуренный, при отложении был жидким (или полужидким). Что это могло быть?

Отчетливая лопастевидная граница прослеживалась на сотни километров и везде ограничивала морфологически однородную поверхность обширного вещественного комплекса (формацию Ваститас Бореалис), занимающего основную часть северных равнин (см. рис.1). Паркер с соавторами выдвинули смелую гипотезу: граница

формации Ваститас представляет собой береговую линию, а сама формация — донные отложения океана, когда-то заполнявшего северные низины Марса. Источником воды для такого океана считались крупнейшие каналы истечения вокруг равнины Хриса.

Планетологическое сообщество восприняло эту идею как очередную гипотезу, основанную почти исключительно на морфологических наблюдениях. Для предположения такого масштаба одной морфологии явно недостаточно. Дело, однако, осложнялось тем, что в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века просто не было другой информации, которая бы подкрепляла или опровергала предположение Паркера и его соавторов. Критически важным типом данных для такой проверки могла стать топография, но детальные топографические исследования поверхности Марса к тому времени еще не проводились.

Ситуация радикально изменилась после получения данных лазерного высотомера MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), установленного на борту космического аппарата Mars Global Surveyor. Это были первые высокоточные и тщательно выверенные (с учетом влияния гравитационного поля) измерения топографии Марса. После получения первых данных MOLA сразу же была проверена гипотеза Паркера. Если граница формации Ваститас действительно представляет собой береговую линию, то она должна располагаться вблизи одного топографического уровня, даже с учетом возможных длинноволновых изменений региональной топографии. В работах известного

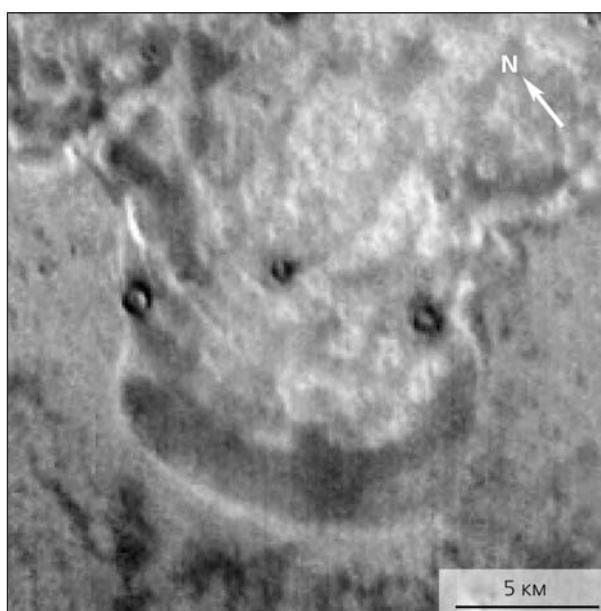
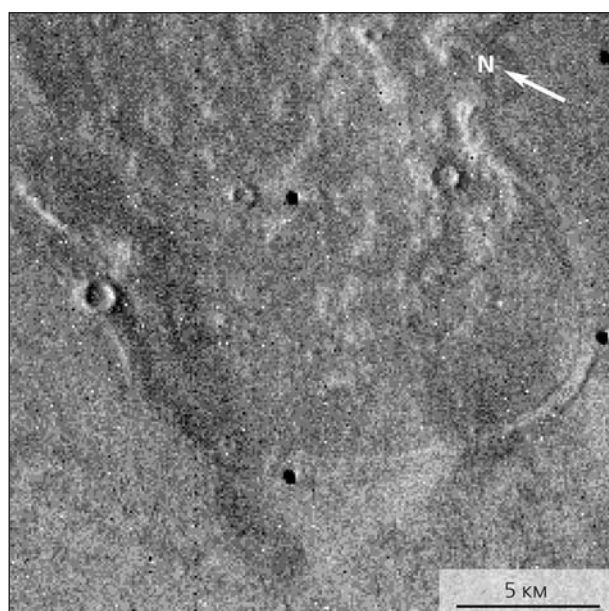


Рис.2. Лопастевидная граница формации Ваститас Бореалис (верхняя и центральная часть изображений), которая интерпретируется как возможная береговая линия северного океана Марса. Слева — изображение, переданное космическим аппаратом Viking, справа — та же структура, но на снимке спектрометра THEMIS (тепловая съемка в дневное время марсианских суток).



американского геолога Дж.Хэда с соавторами показано, что граница формации Ваститас, отмеченная Паркером, действительно лежит вблизи одного топографического уровня — примерно –3.7 км [5, 6].

Казалось бы, все в порядке, гипотеза Паркера получила важное подкрепление, и северный океан, вероятно, существовал в далеком прошлом планеты. Его возраст определяется по количеству ударных кратеров, накопившихся на поверхности формации Ваститас. Частотно-размерное распределение кратеров указывает на то, что ее возраст составляет 3.5 млрд лет. Работы Хэда с коллегами опирались на ограниченный массив данных: высотное положение границы формации Ваститас определялось всего лишь в тысяче точек, тогда как общая протяженность границы составляет примерно 20 тыс. км. Кроме того, высоты границы отклонялись от среднего уровня на 100–200 м, что, по мнению многих планетологов, слишком много для эквипотенциальной поверхности.

Гипотезу о существовании северного океана Марса было решено проверить еще раз с помощью данных топографии уже после завершения работы высотомера MOLA. В 2003 г. вышла статья, в которой анализировалась топографическая конфигурация границы формации Ваститас с помощью глобальной топографической карты Марса с разрешением 1/128° (такое разрешение составляет примерно 0.5 км на экваторе планеты). Результаты исследования не дали однозначного результата [7]. Высоты поверхности вдоль закартированной границы, хотя и тяготеют к средней высоте примерно –4 км, все же отклоняются от нее более чем на 500 м.

Подобные колебания высоты береговой линии предполагаемого океана могут иметь разное объяснение. Во-первых, формация Ваститас может не иметь никакого отношения к океану, а ее граница не есть береговая линия. Во-вторых, поздние эпейрогенические колебания могли изменить высотное положение границы формации, которая все-таки представляла собой береговую линию. В-третьих, положение границы, отмеченное на карте Паркера, не совсем точное, что вносит ошибки, (возможно значительные) в определение ее топографической конфигурации.

Таким образом, топографическое исследование границы формации Ваститас без детального анализа ее местоположения не позволяет однозначно принять или отвергнуть существование северного океана на Марсе. Какие еще могут быть собраны факты, противоречащие или поддерживающие эту гипотезу? Удивительно, но фактов, прямо ей противоречащих, нет. Ее противники оперируют расплывчатыми аргументами типа «такого не может быть, потому что не может быть никогда». А вот факты, согласующиеся с гипотезой океана и поддерживающие ее, есть. Давайте их рассмотрим.

## Морфологические свидетельства северного океана

**Ударные кратеры.** Одно из главных следствий гипотезы существования северного океана — предположение о насыщенности водой (вероятно, в форме льда) его донных отложений, которые, возможно, относятся к формации Ваститас Бореалис. Если это так, то ее материал должен откликаться на формирование ударных кратеров особым способом, отличным от образования кратеров в сухих породах. В частности, выбросы из кратеров, попадающих во влажную мишень, будут носить следы «флюидизации» (течения), более или менее проявленной в зависимости от количества воды в породах.

При фототопографическом изучении равнины Утопии (реликта древнего крупного ударного бассейна диаметром около 2500 км) — наиболее выраженной топографической депрессии северных равнин — было установлено, что кратеры крупнее 1 км в диаметре имеют разную морфологию в зависимости от того, где они находятся [8].

Наиболее деградированные кратеры (кратеры-призраки) расположены исключительно в пределах формации Ваститас. Они утратили практически все атрибуты ударных структур, за исключением круговой формы. Вероятно, кратеры-призраки — относительно более древние ударные структуры, погребенные под толщей формации Ваститас, материал которой задрапировал и сгладил их изначальную форму.

Помимо кратеров-призраков в равнине Утопии видны многочисленные ударные кратеры, нарушающие поверхность формации Ваститас и, следовательно, образовавшиеся после ее становления. Такие кратеры характеризуются различной морфологией выбросов: одни из них многослойные, состоящие из лопастей с четким краевым валом, другие — лепешковидные, без лопастей (рис.3). И та и другая форма представляют собой вариации флюидизированных выбросов и указывают на наличие воды в породах мишени. Вот только количество воды там было, по-видимому, не одинаковым.

Края лопастей обвалованных выбросов (см. рис.3, слева) после образования не демонстрируют заметных изменений. Это указывает на то, что количества воды в породах мишени было достаточно для разжижения выброшенного при ударе материала, но не хватало для проявления отчетливых следов постформационной деградации выбросов.

Лепешковидные выбросы (см. рис.3, справа) резко отличаются от обвалованных многочисленными нишами, пустотами, извилистыми заливами и выступами. В некоторых случаях видны останцы, полностью отделенные от основного массива. Такие особенности морфологии лепешковидных выбросов можно было бы приписать их подтоплению материалом формации Ваститас. Однако это

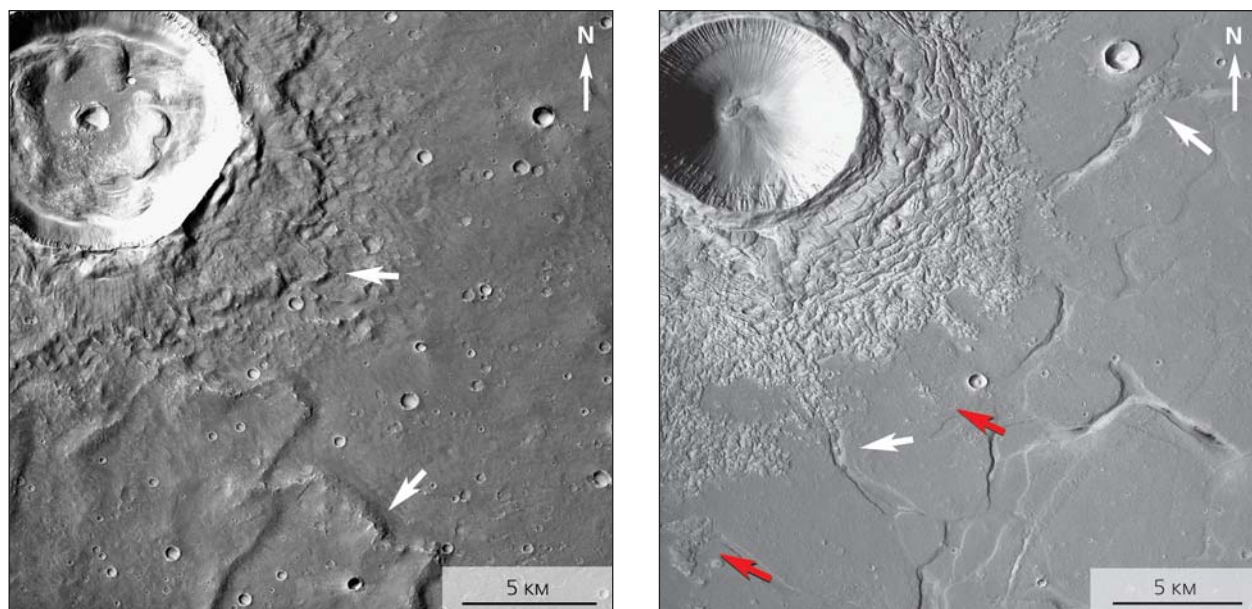


Рис.3. Морфологические типы кратерных выбросов в равнине Утопии. Слева — обвалованные выбросы, которые характеризуются перекрывающимися лопастями, в их краевых частях виден невысокий вал (показан белыми стрелками). Свидетельства постформационной деградации выбросов отсутствуют. Фрагмент изображения СТВВ21\_017919\_2015. Центр изображения с координатами 23.4°с.ш., 101.3°в.д. Справа — лепешковидные выбросы, сильно деградировавшие после их становления. Они характеризуются пустотами в сплошном покрове и полностью отделенными от основного массива останцами (показаны красными стрелками). Полигональные трог (отмечены белыми стрелками) контролировали распространение выбросов, и следовательно, они древнее. Фрагмент изображения СТВВ18\_016521\_2109, центр изображения с координатами 31.4°с.ш., 108.0°в.д.

не так. Поверхность формации разбита сетью более молодых грабен, контролирующих распространение части лепешковидных выбросов. Значит, они заведомо моложе пород формации Ваститас и не могут ими подтопляться. Характерные же структуры выбросов — результат их значительной деградации.

Если в породах мишени, где формировались кратеры с лепешковидными выбросами, было больше воды (и других летучих соединений), то их усиленная деградация получает свое естественное объяснение: испарение и сублимация воды из переотложенного и частично разогретого материала должны приводить к обрушению поверхности в тех местах, откуда летучие ушли. Если последних было много, то картина обрушения становится различной на фотоизображениях и выражается в характерной морфологии лепешковидных выбросов.

В равнине Утопии кратеры с обвалованными и лепешковидными выбросами не перемешаны в пространстве, а демонстрируют четкую зональность: по мере удаления от края формации Ваститас растет доля лепешковидных кратеров (рис.4). Такая зависимость говорит о том, что суммарное количество воды в породах мишени возрастало во внутренних частях топографической депрессии равнины. Предположим, что основным источником воды здесь служили породы формации Ваститас,

которые действительно были донными отложениями северного океана. Тогда по мере удаления от его края должна увеличиваться толщина формации и, соответственно, вклад ее пород в насыщение водой выброшенного материала ударных кратеров.

**Грязевые потоки.** Вблизи центральных частей равнины Утопии, там, где ее поверхность не перекрыта молодыми отложениями, наблюдаются многочисленные обширные (многие десятки километров в поперечнике), низкие (несколько десятков метров в высоту) и плосковершинные покровы с лопастными границами (рис.5). Многие из них пространственно ассоциируют с системами узких трещин, изливаются из них и распространяются вниз по региональному склону. Иногда покровы радиально расходятся от невысоких куполов. Все эти признаки указывают на то, что потоки сложены маловязким материалом, излившимся из резервуаров под поверхностью формации Ваститас.

Поверхность формации там, где развиты потоки, разбита системами широких полигональных трогов. В большинстве случаев существуют несомненные свидетельства того, что они моложе потоков.

Потоки, как правило, состоят из двух частей с резко различной морфологией (см. рис.5). Более высокая часть представлена плато с гладкой поверхностью, которое ограничено извилистым,

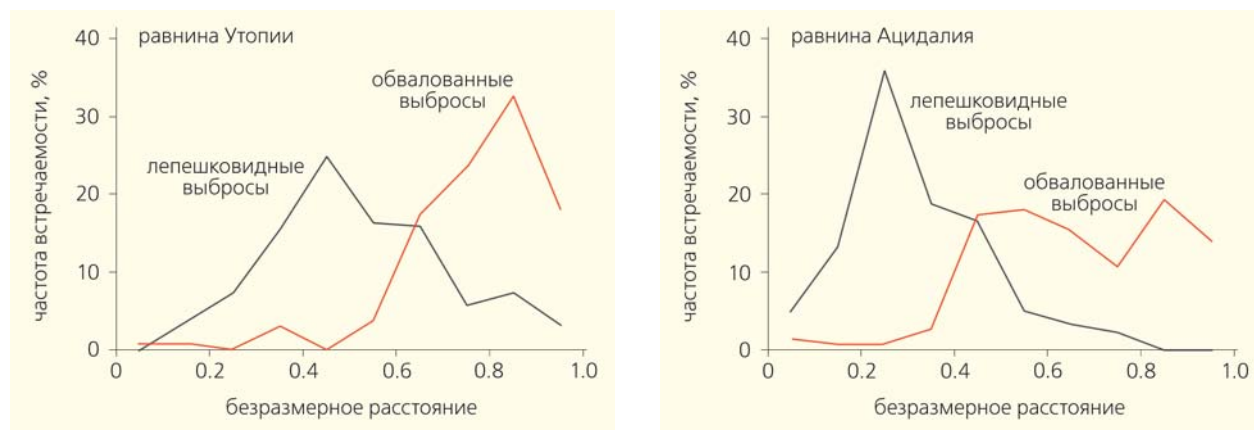


Рис.4. Пространственное распределение ударных кратеров с обвалованными и лепешковидными выбросами в равнинах Утопии и Ацидалии. Видна отчетливая зависимость: количество лепешковидных выбросов нарастает по мере приближения к центру бассейна. Безразмерное расстояние представляет собой отношение расстояния от кратера до центра бассейна к диаметру бассейна.

фестончатым уступом. Низкая часть состоит из многочисленных бугров и хаотично ориентированных гряд. Из-за этого ее поверхность становится неровной, а граница — чрезвычайно извилистой. В некоторых местах на продолжении краев нижних частей потоков видны скопления маленьких (несколько километров) бугров, которые полностью отделены от основного массива потока, но продлевают его тренд. Это — останцы потоков.

Типичные структуры верхнего плато — округлые или слегка удлиненные ямки, их цепочки и кластеры. У них нет вала, а размеры изменяются в узком интервале, что приводит к крутому наклону кривой их частотно-размерного распределения (примерно минус пять). Отсутствие вала и крутой наклон распределения резко отличают ямки от ударных кратеров. Вероятно, ямки представляют собой провальные структуры. На краях они часто сливаются и образуют глубокие заливы внутрь плато. В тех случаях, когда ямки разрастаются, они разрушают нижнюю часть потоков, оставляя после себя небольшие плосковершинные останцы (мезы) и короткие хаотично ориентированные гряды.

Итак, форма потоков и их связь с трещинами и куполами указывают на то, что они образовались в результате эффузивных вулканических излияний какого-то материала. Какого? На этот вопрос отвечают характерные морфологические признаки потоков.

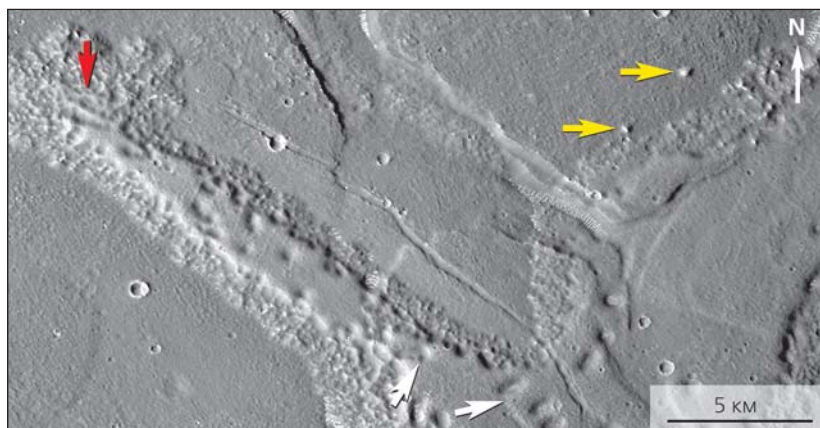


Рис.5. Грязевой поток в равнине Утопии. Его верхняя часть представляет собой гладкое плато с фестончатыми краями и многочисленными провальными ямками (показаны белыми стрелками), которые местами сливаются друг с другом и разрушают поверхность плато. У края потоков из-под верхнего плато выступает сильно деградировавшая часть с лопастевидными границами (отмечена красной стрелкой). Иногда на краю потоков видны останцы, полностью отшнурованные от основного массива (обозначены желтыми стрелками). Фрагмент изображения СТХР02\_001977\_2123. Центр изображения с координатами 31.6°с.ш., 109.4°в.д.

Фестончатый, очень извилистый уступ, ограничивающий верхнее плато, свидетельствует о разрушении и отступании края потока с течением времени (рис.6). Это может указывать на то, что материал потоков был непрочным. На месте верхнего плато часто видны изолированные мезы — останцы бывшего когда-то сплошным плато. Мезы также говорят о непрочности вещества потоков и о возможном присутствии в нем летучих соединений, удаление которых вызвало обрушение поверхности и формирование изолированных останцов. Многочисленные провальные ямки на верхнем плато тоже свидетельствуют о малой прочности материала потоков и его обрушении. Размеры ямок



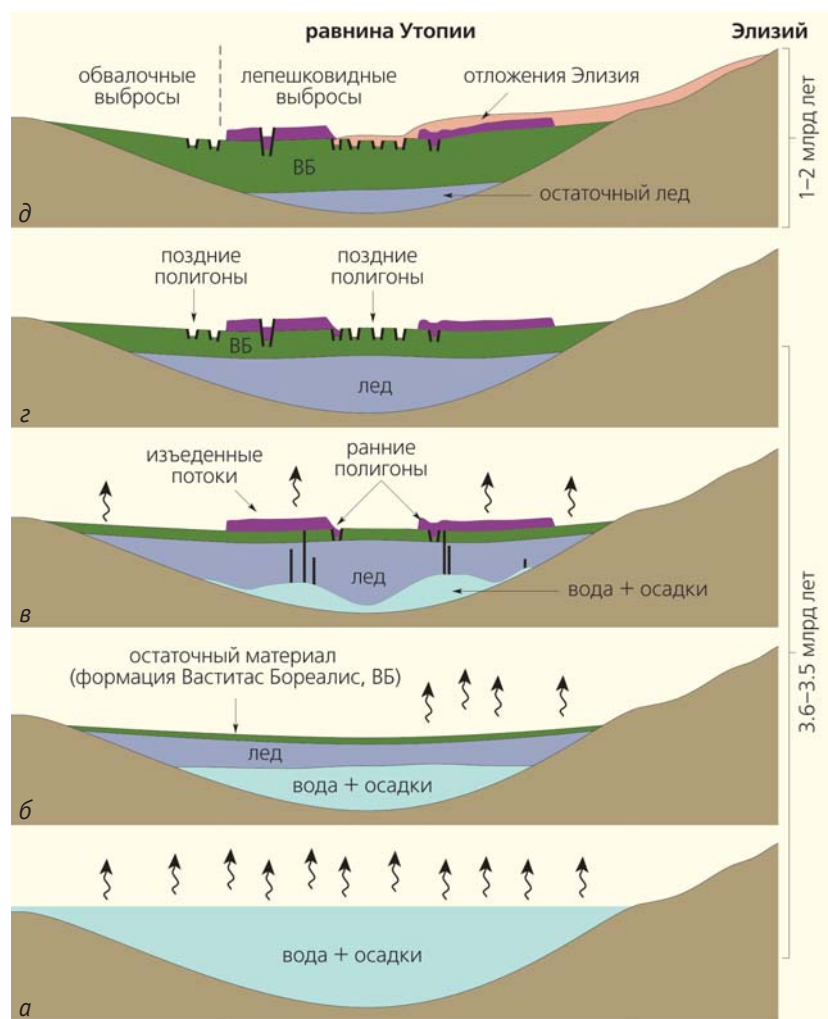


Рис.6. Генерализованная модель эволюции крупного водо-грязевого резервуара в равнине Утопии. Схема вне масштаба, пояснения в тексте. Снизу вверх: *а* — заполнение исходной низменности водой и осадками, интенсивная сублимация; *б* — сублимация и формирование остаточных отложений (формация Ваститас Бореалис), рост ледового слоя; *в* — выдавливание грязевой составляющей под весом ледового слоя, формирование изъеденных потоков, начало растрескивания поверхности; *г* — полное замерзание резервуара, его объемное расширение, формирование поздних полигонов на поверхности; *д* — отложение вулканического материала на поверхность Утопии.

(несколько сотен метров), однако, исключают их формирование за счет провала кровли из-за выхода газовых пузырей, которые могли бы возникать при излияниях газонасыщенных лав. Поверхность нижней части потоков сильно деградирована и состоит из отдельных, нередко разрозненных фрагментов — мез и хаотичных гряд. Морфология потоков резко контрастирует с гладкой примыкающей поверхностью и похожа на ту, что присуща лепешковидным выбросам из кратеров.

Характерные морфологические признаки потоков резко отличают их от «обычных», маловязких лав. Реконструкция возможной исходной формы потоков в равнине Утопии показывает, что

существенная часть их объема (30–50%) была потеряна в результате постформационной дегградации. Это позволяет интерпретировать их как грязевые потоки, которые при своем становлении содержали большое количество воды и льда. Такой вывод полностью согласуется с зональным распределением кратеров с обвалованными и лепешковидными выбросами. Потоки никогда не встречаются там, где преобладают обвалованные выбросы, и обильны в зоне распространения лепешковидных выбросов.

Каким может быть механизм формирования грязевых потоков? Очевидно, что в первую очередь требуется наличие источников разжиженного материала под поверхностью равнины Утопии. Эти источники, вероятно, представляют собой остатки более крупного водо-грязевого резервуара, существовавшего в топографической низменности равнины (см. рис.6,а). Его эволюцию при современных климатических условиях на Марсе исследовали многие авторы, которые пришли к единому и вполне естественному выводу: такой резервуар должен очень быстро (в геологическом смысле) замерзнуть. Затем начинается его медленное промерзание и сублимация ледяного панциря. Сублимация льда должна оставлять на поверхности слой нелетучих силикатных компонентов, которые, постепенно накапливаясь, образуют тело формации Ваститас (см. рис.6,б). По мере промерзания, из-за неизбежных

внутренних неоднородностей, резервуар будет разделяться на изолированные камеры, заполненные жидкой грязево-рассольной смесью. Увеличение давления на камеры за счет продолжающегося промерзания и нагрузки со стороны перекрывающего силикатно-ледяного слоя может спровоцировать извержение грязевой смеси на поверхность и формирование грязевых потоков (см. рис.6,в). После полного промерзания резервуара грязевой вулканизм прекращается, а увеличение объема замерзшего водо-грязевого тела приводит к растрескиванию его поверхности с образованием сети полигональных грабенов (см. рис.6,г), широко распространенных в равнине Утопии.



## Только ли Утопия?

Итак, необычная форма выбросов из кратеров и грязевые потоки свидетельствуют о возможном существовании в далеком прошлом (3.5–3.6 млрд лет назад) в бассейне равнины Утопии крупного водного или, скорее, водо-грязевого резервуара (см. рис.7). Мог ли он быть частью более крупного северного океана, как предполагали Паркер и его коллеги? Если океан существовал, то образования, подобные тем, что наблюдаются в Утопии, должны присутствовать и в других крупных низменностях северных равнин Марса.

Один из таких регионов — равнина Ацидалия. Эта большая низина расположена примерно в 7 тыс. км к западу от Утопии, сразу у окончания крупнейших каналов истечения в равнине Хриса. Вынесенный из них материал в первую очередь должен накапливаться в Ацидали, где, таким образом, мог сформироваться крупный водо-грязевой резервуар. Если и в Ацидали существуют формы, подобные обнаруженным в Утопии, то они могут свидетельствовать об общей геологической истории обоих регионов и тем самым поддержать гипотезу северного океана. Если же в Ацидали таких образований нет, то это сильный аргумент против данной гипотезы.

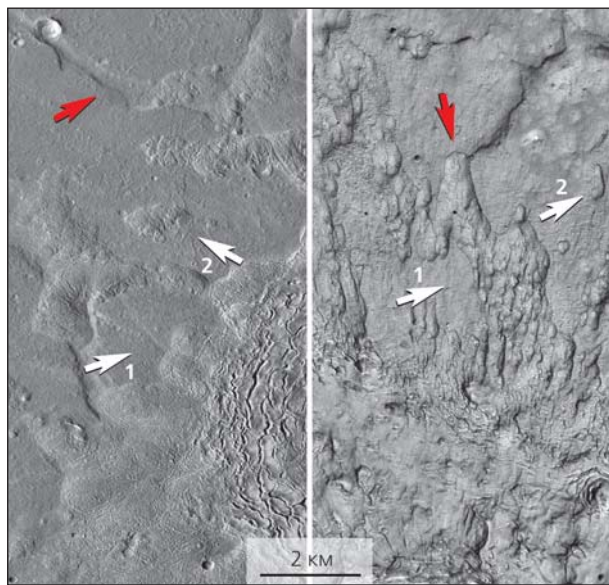


Рис.7. Лепешковидные выбросы из ударных кратеров во внутренних частях равнин Утопии (слева) и Ацидали. И в том и в другом случае выбросы характеризуются пустотами в сплошном покрове (1) и фрагментами, полностью отделенными от основного массива (2). Полигональные трог контролировали распространение выбросов (показаны красными стрелками). Левый снимок — фрагмент изображения CTX\_B19\_017207\_2021, центр изображения с координатами 21.0°с.ш., 100.6°в.д. Правый — фрагмент изображения CTX\_D01\_027431\_2101, центр изображения с координатами 30.7°с.ш., 334.7°в.д. Север вверху.

Фотогеологический анализ поверхности Ацидалийской равнины показал [9], что в этом регионе представлены многочисленные ударные кратеры как с обвалованными, так и с лепешковидными выбросами (рис.7). Кратеры, как и в равнине Утопии, распределены зонально, т.е. их количество увеличивается по мере удаления от края формации Ваститас (см. рис.4, справа). Центральные области Ацидали, кроме того, характеризуются сетью полигональных трогов и многочисленными потоками, которые по общей морфологии аналогичны отмеченным в равнине Утопии. В Ацидали полигональные трог также пересекают поверхность потоков. Морфологические детали, различимые на снимках высокого разрешения, резко отличают их от потоков обычных «горячих» лав и позволяют уверенно интерпретировать ацидалийские потоки как проявления грязевого вулканизма (рис.8).

## Так был ли северный океан?

В двух крупнейших удаленных друг от друга топографических депрессиях северных равнин Марса есть надежные морфологические свидетельства присутствия водо-грязевых резервуаров. Представляли ли они части единого северного океана, как

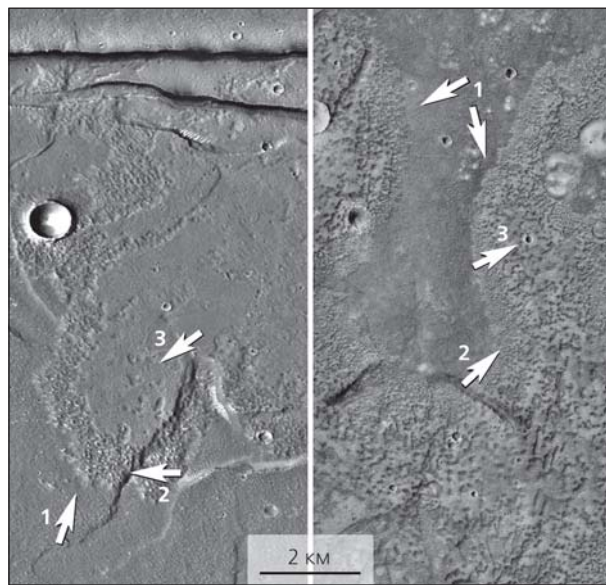


Рис.8. Грязевые потоки широко распространены во внутренних частях равнин Утопии (слева) и Ацидали. Потоки в обоих регионах имеют идентичные морфологические характеристики: лопастевидные края (1), изъеденную нижнюю часть потока (2) и верхнее плато с фестончатым уступом и провальными ямками (3). На левом снимке приведен фрагмент изображения CTX\_B18\_016521\_2109, центр изображения с координатами 32.1°с.ш., 108.0°в.д. На правом — фрагмент изображения CTX\_D02\_027919\_2214, центр изображения с координатами 41.1°с.ш., 332.5°в.д. Север вверху.

считал Паркер с коллегами [3, 4, 10], или это были изолированные водо-грязевые тела, которые сформировались независимо друг от друга, как предполагали другие исследователи [11–13]?

Важный критерий проверки данных гипотез — время формирования формации Ваститас. Например, если оценки ее возраста в равнинах Утопии и Ацидалии будут сильно отличаться друг от друга, то это практически отвергает гипотезу единого океана. Если возраста будут близки, то это согласуется с гипотезой существования океана, но и не исключает возможности независимого формирования водных резервуаров в равнинах Утопии и Ацидалии.

В практике планетологических исследований возраст поверхности почти всегда определяется по частотно-размерному распределению ударных кратеров. Этот универсальный способ датировок позволяет, однако, определять только модельные оценки возраста. Последние зависят от наших представлений об интенсивности потока метеороидов, пересекающих орбиту той или иной планеты, и от их частотно-размерного распределения.

Здесь нет возможности вдаваться в детали методики по применению кратерной статистики для определения возраста. Надо лишь сказать, что данные по частотно-размерному распределению ударных кратеров калиброваны для лунной поверхности по определениям абсолютного радиометрического возраста в образцах, привезенных с Луны. Для Марса форма кривой частотно-размерного распределения кратеров подобна лунной, что свидетельствует о похожем распределе-

нии ударников. Астрономические наблюдения за малыми телами вблизи орбиты Красной планеты и за ее пределами позволяют, кроме того, предполагать, что интенсивность потока метеороидов, пересекающих орбиту Марса, в полтора-два раза выше, чем на Луне. Таким образом, калиброванные данные по кратерной статистике нашего спутника могут экстраполироваться для оценки модельного абсолютного возраста марсианской поверхности.

Точность модели, предсказывающей абсолютный возраст поверхности формации Ваститас, имеет второстепенное значение. Более важны близость или расхождение этих оценок для разных регионов в пределах формации. Результаты измерений и подсчета кратеров в равнинах Утопии и Ацидалии показывают, что в первом случае возраст поверхности может быть оценен в  $3.57 \pm 0.02$  млрд лет, а во втором — в  $3.61 \pm 0.05 / -0.08$  млрд лет. Ошибки определения возрастов полностью перекрываются, что не исключает одновременного формирования водных резервуаров в обоих регионах. Такой вывод полностью согласуется с гипотезой единого северного океана (рис.9).

Тем не менее, гипотеза осложняется двумя наблюдательными фактами. Во-первых, на водоразделе между низменностями равнин Утопии и Ацидалии отсутствуют морфологические и топографические признаки перетекания воды из одного бассейна в другой. Но следует отметить, что водораздел расположен в высоких ( $65-70^\circ$ ) северных широтах, где действующие на протяжении миллиардов лет перигляциальные процессы могли бы эффективно скрывать и разрушать свя-

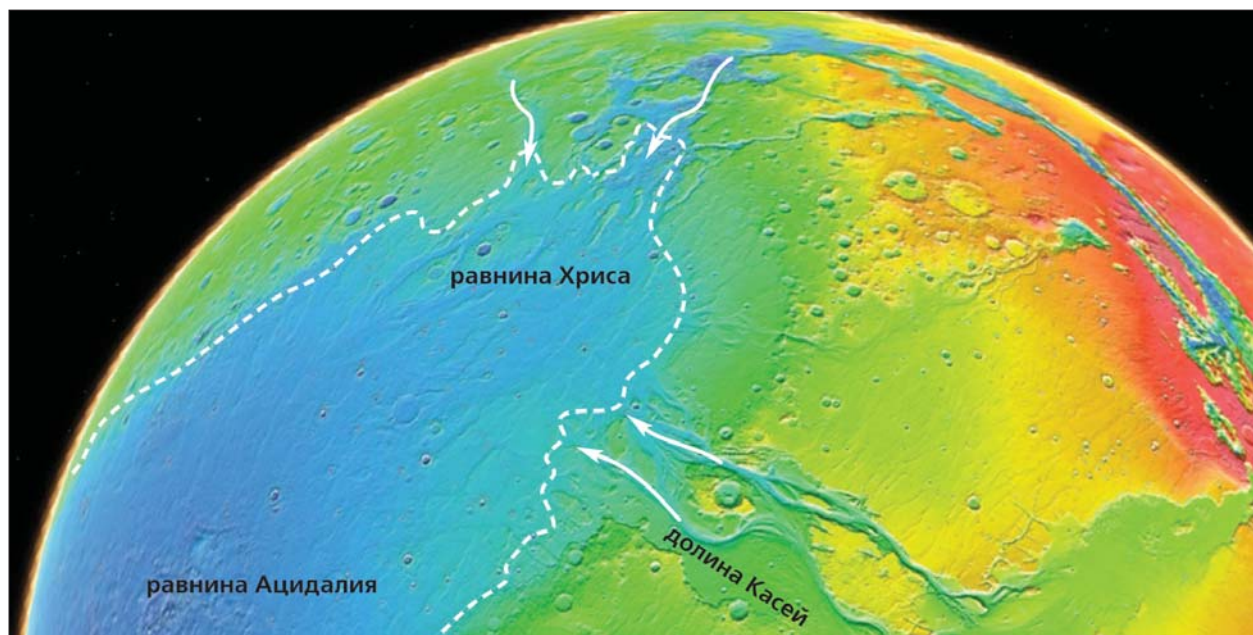


Рис.9. Область впадения каналов истечения в северные равнины Марса. Холодные тона — понижения рельефа, теплые — повышения. Поперечник долины Хриса — примерно 800 км. Вид с запада на восток.

занные с перетеканием воды структуры. Во-вторых, высотное положение края формации Ваститас в равнинах Утопии и Ацидалии, хотя и близко, все же различается примерно на 300 м (граница в Утопии выше). Такая разница высот противоречит требованию единого гипсометрического уровня для береговой линии океана. Это требование, однако, кажется слишком строгим: ведь за более чем 3 млрд лет (которые прошли с момента становления формации Ваститас) эпейрогенические движения вполне могли изменить высотное положение изначально горизонтальной поверхности. Для исследования таких движений и оценки их возможной амплитуды требуется провести тщательный морфологический и топографический анализ всей различной границы формации Ваститас.

Таким образом, потенциальные проблемы гипотезы северного океана можно сравнительно легко решить, не выходя за ее рамки. Альтернативное предположение о независимом формировании водо-грязевых резервуаров Ацидалии и Утопии сталкивается с более существенной трудностью, а именно с полным отсутствием морфологических и топографических признаков источника воды, когда-то заполнявшей равнину Утопии.

\* \* \*

Детальный фотогеологический анализ поверхности северных равнин Марса выявил формы рельефа, указывающие на существование там в далеком прошлом водо-грязевого резервуара или резервуаров большой протяженности (тысячи километров). Эти образования — естественные в ряду форм рельефа и вещественных комплексов, имеющих водное происхождение. Итак, вода на Марсе была и есть, а масштабы проявлений ее геологической деятельности изменяются от пределов разрешения телевизионных камер марсоходов (сотен микрометров) до размеров возможного океана (тысяч километров).

При всей несомненности присутствия воды достоверных признаков жизни (хотя бы микроскопической) на Марсе пока не найдено. Это дает основание думать, что вода — необходимое, но все-таки недостаточное условие для возникновения и поддержания жизни. А может, мы просто не там ищем? Может быть, марсианская жизнь скрывается под поверхностью планеты, где теплее, где, возможно, существует вода в свободном состоянии и нет губительной для живых организмов солнечной радиации? ■

## Литература

1. Первые шаги на Марсе // Природа. 1998. №3. С.46–72.
2. Tanaka K.L., Skinner J.A., Hare T.M. Geologic map of the northern plains of Mars. US Geological Survey Sci. 2005. Inv. Map. P.2888.
3. Parker T.J., Saunders R.S., Schneeberger D.M. Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: Implication for modification of the Lowland/Upland boundary // Icarus. 1989. V.82. P.111–145.
4. Parker T.J., Gorsline D.S., Saunders R.S. et al. Coastal geomorphology of the Martian northern plains // J. Geophys. Res. 1993. V.98. P.11061–11078.
5. Head J.W., Kreslavsky M.A., Hiesinger H. et al. Oceans in the past history of Mars: Tests for their presence using Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data // Geophys. Res. Lett. 1998. V.25. P.4401–4404.
6. Head J.W., Hiesinger H., Ivanov M.A. et al. Possible ancient oceans on Mars: Evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter data // Science. 1999. V.286. P.2134–2137.
7. Carr M.H., Head J.W. Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate // J. Geophys. Res. 2003. V.108. P.5042. Doi:10.1029/2002JE001963.
8. Ivanov M.A., Hiesinger H., Erkeling G., Reiss D. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia // Icarus. 2014. V.228. P.21–140.
9. Ivanov M.A., Hiesinger H., Erkeling G., Reiss R. Evidence for large reservoirs of water/mud in Utopia and Acidalia Planitiae on Mars // Icarus. 2015. V.248. P.383–391.
10. Clifford S.M., Parker T.J. The evolution of the Martian hydrosphere: Implications for the fate of primordial ocean and the current state of the northern plains // Icarus. 2001. V.154. P.40–79.
11. Jöns H.-P. Late sedimentation and late sediments in the northern lowlands on Mars // Lunar Planet. Sci. 1985. V.16. P.414–415.
12. Jöns H.-P. Large fossil mud lakes or giant mud sheet floods in Syrtis Major (Isidis Planitia) and Mare Australe, Mars // Lunar Planet. Sci. 1987. V.18. P.470–471.
13. Tanaka K.L., Skinner J.A., Hare T.M. et al. Resurfacing history of the northern plains of Mars based on geologic mapping of Mars Global Surveyor data // J. Geophys. Res. 2003. V.108. P.8043. Doi:10.1029/2002JE001908.



# Поможет ли климату парижское «лекарство»?

А.А.Киселев, И.Л.Кароль

В декабре 2015 г. в Париже состоялась Международная конференция по климату (COP21). Было подписано соглашение, направленное на поддержание увеличения средней температуры воздуха у поверхности планеты на уровне ниже 2°C. Однако оценка значимости этого события оказалась далеко не однозначной. Так, по мнению министра иностранных дел Франции Лорана Фабиуса, соглашение стало «историческим поворотным пунктом» на пути снижения темпов глобального потепления, а известный американский климатолог Джеймс Хансен назвал его мошенническим. Вполне естественно, что наличие диаметрально противоположных суждений вкупе с важностью проблемы для всех жителей планеты породили всплеск интереса как у специалистов, так и у обычных людей. Массмедиа живо откликнулись на это потоком публикаций, не остались в стороне научные и научно-популярные издания. В мартовском номере «Природы» вышла статья А.В.Бялко [1], в которой с помощью простых уравнений показано, как может измениться климат в ближайшие десятилетия. Автор, отмечая недостаточную точность предложенного подхода, высказывает свое мнение о том, насколько реально достичь желаемого результата в рамках Парижского соглашения. В последующие ме-



**Андрей Александрович Киселев**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела динамической метеорологии Главной геофизической обсерватории имени А.И.Воейкова (г.Санкт-Петербург). Область научных интересов — фотохимические процессы в атмосфере.



**Игорь Леонидович Кароль**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией той же обсерватории. Специалист в области моделирования климата, фотохимических и радиационных процессов в атмосфере. Многие годы занимается проблемами атмосферного озона.

**Ключевые слова:** климат, Парижское соглашение, парниковые газы.  
**Key words:** climate, Paris Agreement, greenhouse gases.

сяцы в научной периодике был опубликован ряд статей, всесторонне исследующих современное состояние климата, перспективы его изменений и действенность мер по обузданию глобального потепления. Представленные в них результаты показались нам интересными, и мы решили вновь вернуться к обсуждению этой животрепещущей проблемы.

## По маршруту Киото–Париж

Глобальное потепление стало одной из примет нашего времени. Его темпы сегодня беспрецедентно высоки: об этом свидетельствуют комплексные результаты всемирной системы наблюдений [2]. Неудивительно, что в такой ситуации каждое из последних десятилетий было отчетливо теплее предыдущего. Виновником сложившего-





Рис.1. Участники Парижской конференции ООН по климату.

ся положения международное научное сообщество называет человечество, хозяйственная деятельность которого способствует росту содержания в атмосфере парниковых газов (двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ , метана  $\text{CH}_4$ , закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  и др.), а с ним и усилению парникового эффекта\*. Это зафиксировано в ряде международных соглашений, в частности в Рамочной конвенции об изменении климата 1992 г.

Масштабность явления уже тогда поставила перед правительствами ведущих экономических держав и рядом международных организаций второй из вечных русских вопросов: «Что делать?». Первой попыткой снизить темпы глобального потепления стало введение в действие в 2005 г. Киотского протокола, регламентировавшего выбросы парниковых газов в последующие десятилетия. Напомним, что по разным причинам в нем не участвовали крупнейшие эмитенты — США и Китай, а также Индия. На втором этапе действия протокола, начиная с 2013 г., пролонгировать участие в нем отказались Канада, Япония и Россия. В результате действие Киотского протокола по сути сошло на нет: на страны, сохранившие ему верность, приходилось лишь около 15% суммарной эмиссии парниковых газов. Оценкам плюсов и минусов этого документа и, в частности, его низкой эффективности посвяще-

но много публикаций, в том числе и наших [3, 4]. В то же время нельзя сказать, что Киотский протокол стал тем самым «первым блином, который комом», хотя, безусловно, к категории «пальчики оближешь» его тоже не отнесешь. Главным достижением протокола можно считать накопление крупными державами опыта совместных решений и действий в условиях конфликта их экономических интересов.

Договор исчерпал себя, но проблема осталась. Уже много лет в конце каждого года проходят представительные международные форумы, посвященные различным аспектам изменений климата. Все это время на форумах подчеркивались значимость и конструктивность проделанной работы. Тем не менее новое взаимоприемлемое соглашение по климату не появлялось: сказывались различия подходов и интересов [5]. Однако еще Шарль Монтескье отмечал: «Власть климата сильнее всех властей». Как следствие, какое-то решение было необходимо, и оно таки состоялось. На Парижской конференции по климату соглашение принято консенсусом 195 стран в декабре 2015 г. и подписано 175 ее участниками в апреле 2016 года\*\* (рис.1). В его основе лежат регулируемые меры по снижению содержания парниковых газов в атмосфере начиная с 2020 г. Попытаемся разобраться, сколь велики шансы у нового соглашения достичь продекларированных в нем целей.

\* По сравнению с серединой XVIII в. глобальная средняя концентрация углекислого газа выросла на 43%. Весной 2015 г. она преодолела символический пороговый барьер в 400 млн<sup>-1</sup> (1 млн<sup>-1</sup> соответствует 1 молекуле  $\text{CO}_2$  на миллион молекул воздуха).

\*\* В начале сентября 2016 г. соглашение ратифицировали крупнейшие эмитенты (Китай и США), и общее число подписантов достигло 178.

## Точка отсчета — 2014 год

Но обо всем по порядку. Сначала остановимся на существующем положении дел. Поскольку соглашение датируется 2015 годом, резонно в качестве стартового рассмотреть год предыдущий, т.е. 2014-й. По оценкам экспертов, в этом году общемировая эмиссия парниковых газов в атмосферу составила 35.7 млрд т  $\text{CO}_2$ -эквивалента [6]. Напомним, что  $\text{CO}_2$ -эквивалент (эквивалентный выброс  $\text{CO}_2$ ) — это объем выброса углекислого газа, который вызвал бы такое же комплексное радиационное воздействие за данный период времени, как и объем выброса любого долгоживущего парникового газа или смеси парниковых газов [7]. Эквивалентный выброс  $\text{CO}_2$  рассчитывают путем умножения объема выброса какого-либо парникового газа на его потенциал глобального потепления за данный период времени.

Более 60% ежегодной суммарной эмиссии парниковых газов приходится на три крупнейшие экономики мира (Китай, США, Евросоюз) и «примкнувшую» к ним Индию, из коих в Киотском протоколе участвовал лишь Евросоюз (рис.2). Важно



Рис.2. Доля отдельных стран (%) в суммарной эмиссии парниковых газов в 2014 г. [6].

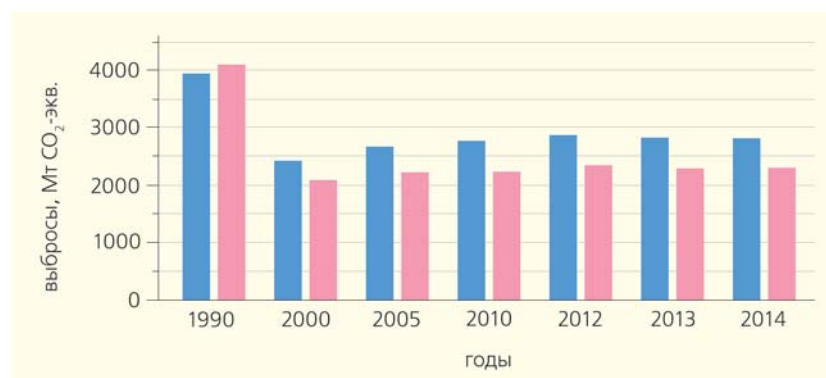


Рис.3. Выбросы парниковых газов с территории России [8] с учетом землепользования и лесного хозяйства (красные столбцы) и без него (синие столбцы).

отметить перманентный рост китайского вклада в суммарную эмиссию: еще в 2008 г. он составлял 20% [4], а к 2015 г. увеличился почти в полтора раза. В результате этого роста совокупная доля выбросов двух стран-лидеров — Китая и США — также заметно увеличилась: до 44.6% в 2014 г. с 38% в 2008-м.

На фоне таких впечатляющих процентов вклады других стран выглядят довольно скромно: лепта «Азиатских тигров»\* и России составляет около 5%, а Японии и того меньше — 3.6%. Тем не менее, памятуя о том, что это *наша* страна, на выбросах с территории России остановимся немного подробнее.

В XXI в. эмиссия парниковых газов в России была довольно стабильной (рис.3). Бросается в глаза, что к 2014 г., по сравнению с 1990 г. (базовым годом Киотского протокола), совокупные выбросы значительно снизились (на 44% — с учетом сектора землепользования и лесного хозяйства и на 28.6% — без него). Причина такого снижения, очевидно, кроется в спаде отечественной промышленности в 1990-х годах. Читателю, несомненно, известна важная роль лесов — «легких планеты» — в поглощении углекислого газа и выделении кислорода в процессе дыхания. Однако продуктивность этого процесса критически зависит от возраста леса (старый лес служит скорее источником  $\text{CO}_2$ , чем его поглотителем) и общего состояния лесного хозяйства. Так, кризис начала 1990-х повлек за собой, в частности, массовые вырубки лесов, следствием чего стало преобладание источника  $\text{CO}_2$  над его стоком. В последующем ситуация кардинальным образом изменилась, и в 2014 г. сектор землепользования стал крупным поглотителем парниковых газов, компенсируя около 18% выбросов, происходивших в остальных секторах [8] (рис.4).

Нетрудно заметить, что вклад отдельных источников в эмиссию парниковых газов в целом соответствует структуре отечественной экономики. В целом такое положение дел сохраняется последние 25 лет: с 1990 г. только доля сельскохозяйственного сектора снизилась с 8 до 4.7%, а доли энергетики и отходов выросли на 1.2 и 2.0% соответственно [8].

Итак, подведем некоторый итог. В последние годы основным локомотивом, обеспечивающим рост общемировой эмиссии парниковых газов в атмосферу, может считаться Китай (а также, хоть и в значительно меньшей степени, Индия). Политика прочих «китов экономики»

\* К «Азиатским тиграм» относятся Таиланд, Малайзия, Сингапур, Индонезия и Южная Корея.

(см. рис.2) основана на удержании выбросов в достаточно узких рамках. Например, у «некиотских» США их рост за период 1990–2010 гг. равнялся 10.4%, а у крупнейших европейских стран выбросы убывали [5]. А что будет, если наложить всеобщее вето на рост эмиссии парниковых газов? Предположим, что в дальнейшем из года в год их выбросы останутся на уровне 2014 г. Ситуация, прямо скажем, идеализированная, но весьма показательная (рис.5). Случись она в реальности, мы станем свидетелями новых температурных рекордов: для повышения глобальной температуры в приземном воздухе на 1.5°C понадобится 6–17 лет, на 2°C — 21–33 года, на 3°C — 56–77 лет (разброс значений возникает вследствие чрезвычайной сложности климатической системы нашей планеты). Перспектива едва ли обнадеживающая, но... Данную схему (см. рис.5) не следует рассматривать как прогноз на ближайшие годы и десятилетия, поскольку приведенные результаты получены из общих балансовых соотношений. Другими словами, авторы использовали довольно грубую модель, вряд ли претендующую на хорошее описание происходящего в действительности. Но мы все же приводим эти данные, ведь они служат прекрасной иллюстрацией того, что ожидает каждого человека (ведь изменения климата касаются каждого!) через *некоторое обозримое время* при отсутствии эффективных мер по противодействию глобальному потеплению. Так что Парижское соглашение подоспело вовремя!

## Париж, 2015 год

О чем же договорились в Париже? Согласно достигнутому соглашению [9], основная задача, стоящая перед мировым сообществом, заключается в том, чтобы направить усилия на «сокращение глобальных ежегодных выбросов парниковых газов... соразмерно целям удержания прироста глобальной средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней и продолжения усилий по ограничению роста температуры до 1.5°C\*». При этом пик эмиссии CO<sub>2</sub> должен быть достигнут «настолько скоро, насколько это окажется возможным». Добиться немедленного изменения тренда, увы, невозможно, более того, увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере будет продолжаться еще некоторое время даже при значительном сокращении его антропогенных выбросов, и только затем начнется спад.

Обратите внимание: здесь снова упоминаются пороговые значения будущих приростов темпера-

\* За этой бюрократически корявой фразой скрывается следующее: в результате совместных усилий нужно добиться, чтобы рост глобальной средней температуры не превзошел 2°C, а еще лучше — 1.5°C.



Рис.4. Вклад отдельных секторов (%) в эмиссию парниковых газов с территории России в 2014 г. [8].

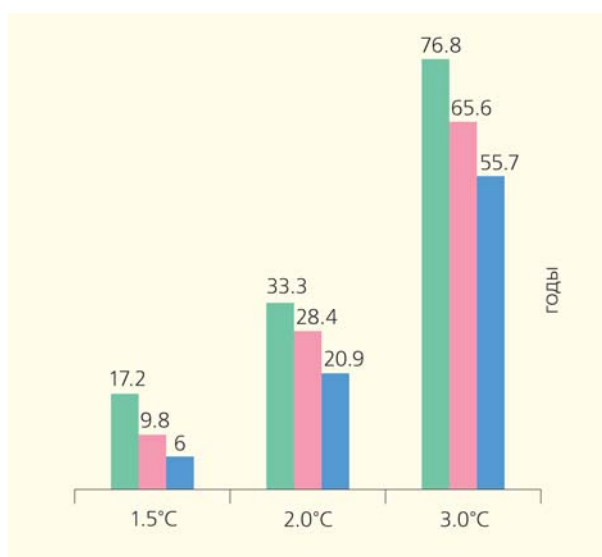


Рис.5. Количество лет до достижения пороговых значений потепления (1.5, 2 и 3°C) при сохранении текущей эмиссии парниковых газов и для различных вероятностей (33, 50 и 66% — показаны зеленым, красным и синим цветом соответственно) непревышения этих пороговых значений. Начало отсчета — 2014 г.

туры в 1.5 и 2°C, но это *иные* приросты. В данном случае отсчет ведется не от 2014 г. (см. рис.5), а от доиндустриального уровня, т.е. от середины 18-го столетия\*\*. Напомним, что только за период 1880–2012 гг. среднеглобальное потепление составило 0.85°C [2], поэтому до двухградусной (и тем более полтораградусной) пороговой отметки дистанция измеряется уже десятками долями градуса. Считается, что превышение порога 2°C повлечет за собой необратимые изменения климата Земли. Между тем, по мнению многих ученых, на сегодняшний день не существует научного обоснова-

\*\* Это справедливо и для порогового значения 3°C, которое ранее рассматривалось как критическое и соответствующее в долгосрочном плане исчезновению льда Гренландии [10].



ния справедливости этого утверждения [11–14], в то же время они признают полезность использования такого порога в качестве общего знаменателя в последующих дискуссиях и исследованиях.

Так или иначе, критические величины прироста приземной температуры обозначены. Самое время ознакомиться с мерами, призванными обеспечить вышеназванные цели. Как и прежде, основным способом борьбы с глобальным потеплением остается сокращение антропогенных выбросов парниковых газов. Однако, если в рамках Киотского протокола регламентация их эмиссии для всех стран заключалась в согласованном ее сокращении, выраженном в процентах относительно 1990 г., ныне подходы совершенно иные. Читатель может в этом удостовериться, ознакомившись с перечнем обязательств крупнейших стран\* по сокращению эмиссии парниковых газов (табл.).

Государства, «прошедшие» через Киотское соглашение (страны Евросоюза, Россия и Япония), а также США по-прежнему строят свои планы по сокращению выбросов парниковых газов, отталкиваясь от базового года (1990-го или 2005-го — в общем-то, не принципиально\*\*). Китай и Индия, занимающие в последнее время второе и седьмое места в мире по размеру ВВП (по данным Международного валютного фонда), увязывают свои

\* В англоязычной литературе такие обязательства называются Intended Nationally Determined Contributions (INDCs) — «Предполагаемые объявленные национальные вклады».

\*\* Однако нельзя не отметить, что для нашей страны выбор базового года важен, так как, в отличие от 2005 г., на 1990-й пришелся промышленный спад, а с ним и минимум выбросов.

**Таблица**

**Список обязательств крупнейших стран по сокращению эмиссии парниковых газов в атмосферу [15, 16]**

Страна	Заявленная цель по сокращению эмиссии парниковых газов	Предполагаемая эмиссия к 2030 г. (млрд т CO <sub>2</sub> -экв.)
Китай	к 2030 г. –60...–65% отношения эмиссии CO <sub>2</sub> к ВВП по сравнению с 2005 г.	12.8–14.3
США	к 2025 г. –26...–28% относительно выбросов в 2005 г.	3.78–4.03
Страны Евросоюза	к 2030 г. –40% относительно выбросов в 1990 г.	3.13
Индия	к 2030 г. –33...–35% отношения эмиссии парниковых газов к ВВП по сравнению с 2005 г.	6.51–6.71
Россия	к 2030 г. –25...–30% относительно выбросов в 1990 г.	2.41–2.58
Япония	к 2030 г. –25% относительно выбросов в 2005 г.	1.01
Индонезия	к 2030 г. –29...–41% относительно сценария BAU	2.05
Таиланд	к 2030 г. –20...–25% относительно сценария BAU	0.44
Южная Корея	к 2030 г. –37% относительно сценария BAU	0.51

обещания уменьшить выбросы именно с этой величиной. «Азиатские тигры» (и не только они) отсчет сокращения эмиссии парниковых газов предпочитают вести от гипотетического сценария BAU\*\*\*. При этом BAU по-разному трактуется разными странами [15]: некоторые предполагают в рамках этого сценария превышающий 200% рост выбросов парниковых газов в период 2010–2030 гг., другие — значительно более умеренное повышение. Малые и развивающиеся страны выказывают готовность сокращать свои выбросы лишь при условии выделения им финансовой поддержки (на эти цели страны-доноры обещали выделить в 2020 г. 100 млрд долл. США). Создается устойчивое впечатление, что весь процесс пущен на самотек и из предлагаемых «национальных» фрагментов единой мозаики не составить.

Усугубляется ситуация и тем, что в соглашении не прописаны какие-либо санкции в случае невыполнения страной декларируемых ею целей, а в международно-правовом смысле сокращение эмиссии для подписантов не обязательно. Мы далеки от нагнетания страстей по этому поводу и надемся на реализацию соглашения в полном объеме, но, как говорится, «из песни слов не выкинешь». Кстати, в документе прямо отмечается, что даже полного исполнения предложенных в настоящее время национальных вкладов недостаточно для решения поставленных задач\*\*\*\*. Такой вывод подкрепляется рядом недавних публикаций. Так, для выполнения целей Парижских соглашений необходимо значительно сократить выбросы парниковых газов в атмосферу [17]: при сохранении существующего положения дел рост глобальной температуры к 2100 г. составит 2.6–3.1°C. Попытка конкретизировать необходимые размеры сокращения эмиссии сделана в исследовании Б.Сэндерсона с коллегами [18], где рассматривается ряд сценариев.

Рассмотрим, какой теоретически должна быть эволюция суммарных выбросов парниковых газов, чтобы глобальное потепление не превысило пороговых значений с вероятностью 66% (рис.6). Ограничиваемся лишь минимальным и максимальным из всех рассмотренных Сэндерсоном вариантов. Они различаются сроками вве-

\*\*\* BAU (Business as usual) — сценарий выбросов парниковых газов без ограничений.

\*\*\*\* В связи с этим в соглашении предусмотрена возможность пересмотра странами-участниками их вклада раз в пять лет.



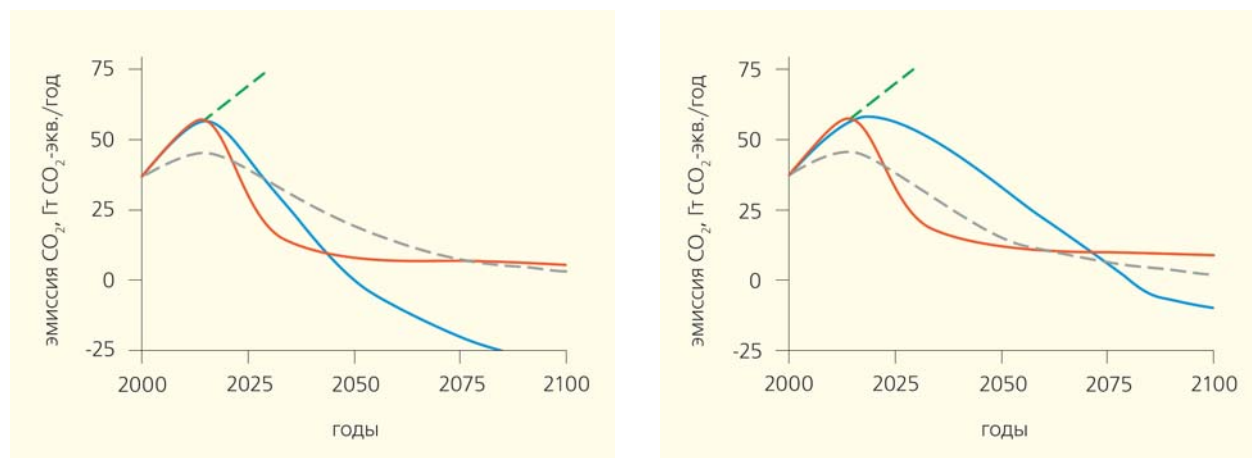


Рис.6. Размер эмиссии  $\text{CO}_2$ , необходимый для того, чтобы потепление не превысило порога в  $1.5^\circ\text{C}$  (слева) и  $2^\circ\text{C}$  (справа) с вероятностью 66%. Красная и синяя линии соответствуют расчетным вариантам с наиболее быстрым и наиболее медленным приспособлением, серый и зеленый пунктиры — сценариям RCP2.6 и RCP8.5 соответственно [18].

дения мер для смягчения антропогенной парниковой нагрузки на климат: наиболее быстрое приспособление начинается в 2005 г., а самое медленное — в 2020 г. На рис.6 для сравнения приведены также эмиссии парниковых газов, соответствующие широко используемым в последние годы сценариям RCP2.6 и RCP8.5\*. Из рисунка очевидно, что чем раньше начнут действовать меры по смягчению антропогенной парниковой нагрузки на климат, тем меньше усилия понадобятся для того, чтобы не выйти за рамки установленных пороговых значений. И напротив, промедление с введением мер чревато необходимостью в будущем технического и экологического обеспечения отрицательных эмиссий (под отрицательными эмиссиями понимается ситуация, когда антропогенное поглощение парниковых газов превосходит их антропогенные выбросы\*\*). По результатам своих расчетов Сэндерсон резюмирует: чтобы уложиться в полуторазградусный лимит, нужно сократить совокупный выброс парниковых газов 2015 г. на треть к 2030 г. и до нуля к 2050 г.; при двухградусном верхнем пределе их выброс необходимо

уменьшить на 10% к 2030 г. и далее следовать сценарию RCP2.6 [18]. Нелишне подчеркнуть, что эти оценки носят «академический» характер, т.е. даны рамки допустимых изменений эмиссии парниковых газов в ближайшем будущем без привязки к конкретным мерам, способным сохранить ее в этих рамках. К сожалению, современные технологии не в состоянии обеспечить осуществление высказанных теоретиками рекомендаций. Кроме того, вряд ли оценки Сэндерсона можно считать истинной в последней инстанции; без сомнения, появятся их дополнения и уточнения. Но как же далеки эти расчеты от реалий сегодняшнего дня!

## Продолжение следует?

При попытке осмыслить изложенное приходится проводить параллели между Парижским и Киотским соглашениями. Очевидно, эти документы объединяет общность цели: «стабилизация концентраций парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему». Второе (Парижское) соглашение указывает, что упомянутое «опасное антропогенное воздействие» начинается при достижении роста температуры на  $2^\circ\text{C}$  относительно ее величины в доиндустриальный период (хотя этот тезис не так строго аргументирован), в то время как первое (Киотское) такого рода критериев не содержит.

В обоих документах закреплены обязательства стран по сокращению эмиссии парниковых газов, недостаточные для достижения заявленной цели. Здесь, правда, существует принципиальное отличие: при обсуждении и подготовке Киотского протокола (по крайней мере во второй половине 1990-х годов) царил иллюзия, что принятые меры смогут серьезно переломить ситуацию с по-

\* Обычно используются четыре сценария: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5. Числа в их названиях показывают критические значения радиационного форсинга, которые не должны быть превышены к 2100 г. [4]. Сценарии RCP2.6 и RCP8.5, таким образом, соответствуют наибольшему и наименьшему регулированию выбросов парниковых газов в атмосферу.

\*\* Сегодня трудно указать реальные механизмы, способные эффективно обеспечить такие отрицательные эмиссии, хотя соответствующие исследования проводятся. Например, недавно была предложена технология «минерализации»  $\text{CO}_2$  и его вывода из атмосферы с помощью базальтовых пород [19], но вряд ли она обладает высокой продуктивностью. В свою очередь, при положительных величинах эмиссии существует опасность достижения климатом «точки невозврата», т.е. ситуации, когда изменения климата становятся необратимыми [1].

теплением климата, и лишь последующие исследования показали, что это не так. При подписании Парижского соглашения заранее было известно (и закреплено в его тексте), что даже при полном выполнении странами их обязательств удержать потепление на двухградусной отметке не удастся. Почему же допустили такое рассогласование цели и средств ее достижения? Причин, по-видимому, несколько. Опыт реализации первого соглашения наглядно продемонстрировал невозможность решения одной из основных проблем XXI в. — борьбы с глобальным потеплением — с наскака, здесь больше подходит метод последовательных шагов: Парижское соглашение можно рассматривать как первый из них. Зримые даже для неспециалистов интенсивные изменения климата последних десятилетий (чередa температурных рекордов, увеличение числа опасных климатических явлений и катастроф) требовали от политиков спешно отреагировать на складывающуюся неблагоприятную обстановку и показать всему миру, что «все под контролем». При этом, разумеется, никуда не делось и стремление вывести свою страну из сложившейся ситуации с наименьшими потерями, а при okazji и заработать — отсюда и разнообразие форм обязательств разных стран, которое по-русски можно описать «кто в лес, кто по дрова». В Киотском протоколе, при всех его недостатках, унификация обязательств была несравненно выше. Возможно, это связано с всеобщим *привыканием* к нависающей дамокловым мечом проблеме. В 1990-х годах угроза скорых нежелательных и трудно контролируемых последствий была в новинку и хотя бы ненадолго породила некоторую сплоченность среди крупнейших экономических держав, однако в последующие два десятилетия произошла постепенная адаптация стран к жизни в условиях меняющегося климата, а с ней снижение остроты восприятия опасности.

Важным шагом вперед в Парижском соглашении, по сравнению с Киотским, надо признать требование наряду с официальной долгосрочной стратегией низкоуглеродного развития иметь и национальный план адаптации к изменениям климата, в том числе программу совершенствования методов хозяйствования над лесными угодьями и почвами — «хранилищами» углерода. Таким образом, пожалуй, впервые официально на одну доску поставлены как меры по прямому сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, так и мероприятия, направленные на приспособление людей к жизни в условиях меняющегося сегодня климата.

Общим для обоих соглашений стало отсутствие какого-либо механизма наказания в случае невыполнения страной взятых ею на себя обязательств (в Киотском протоколе говорится лишь о том, что «каждая страна несет ответственность за свои собственные уровни выбросов»). Не буду-

чи правоведами, мы не можем оценить, сколько трудно разработать документ, регламентирующий эту сторону соглашения. Пока же не остается ничего другого, кроме как полагаться на международный принцип добросовестного выполнения государствами принятых обязательств (*pacta sunt servanda*). В общем, при знакомстве с положениями Парижского соглашения создается устойчивое впечатление, что оно представляет собой не столько строгий международный договор, сколько аморфный «протокол о намерениях».

Едва ли лидеры стран не отдавали себе в этом отчет, ставя свои подписи под соглашением. Но, как когда-то сказал Отто фон Бисмарк, «политика — искусство возможного». Видимо, в данном случае и на данном этапе Парижское соглашение включило в себя максимум того, что не вызвало возражений у руководителей 178 государств. Как было сказано ранее, обещанных в соглашении мер недостаточно. А это значит, что уже в ближайшее время возникнет насущная потребность в укреплении международного сотрудничества в разработке и внедрении более действенных мер по сдерживанию глобального потепления. Хотелось бы, чтобы к пониманию такой потребности удалось прийти в результате широкого диалога, а не лихорадочного отклика на какие-либо форс-мажорные климатические катаклизмы.

В первом пункте Парижской конвенции подчеркивается: ключевой механизм решения глобальной задачи — развитие экологически чистых источников энергии, к коим обычно относят все, что не связано с добычей и использованием топлива, угля и газа: энергию воды, ветра, Солнца, приливов, биомассы\* и др. Однако в современных условиях доля таких источников невелика: даже США, находящиеся в числе лидеров по их использованию, вырабатывают за счет альтернативных источников лишь 10% необходимой стране энергии. Более того, считается, что возобновляемые источники энергии могут быть хорошим дополнением, но не основой электроснабжения — ввиду отсутствия соответствующей дорогостоящей инфраструктуры, трудностей сохранения полученной из таких источников энергии и т.д. Очевидно, потребность в энергопотреблении в мире будет возрастать по причине роста населения и, как следствие, увеличения мирового ВВП, и в ближайшие годы эта потребность едва ли может быть удовлетворена исключительно посредством интенсивного развития безуглеродной энергетики. Но стремиться к этому необходимо. В Китае, где превалирует угольная энергетика, ее постепенно заменяют ветряной. Германия, отказавшаяся от атомной энергетики, также осуществляет переход на ветряную и солнечную, но одновременно вы-

\* Недавно появилась статья, где доказывается, что полный переход на биотопливо приведет не к уменьшению, а к увеличению выбросов CO<sub>2</sub> и других парниковых газов в атмосферу [20].

нуждена включить на полную мощность угольные электростанции. Мы упомянули две крупные экономические державы, занимающие лидирующие позиции в мире (Китай) и в Европе (Германия). В целом же сохраняется приверженность к традиционным углеродным источникам энергии, а темпы введения в строй и последующей эксплуатации возобновляемых источников не впечатляют. Как в мире, так и в России. Известно, что в начале 2015 г. на долю ТЭС, ГЭС и АЭС в нашей стране приходилось 68, 21 и 11% выработанной энергии соответственно\*. На этом фоне доля возобновляемых источников ничтожна: для учета их вклада в общий объем выработанной энергии в процентах с лихвой достаточно пальцев одной руки,

а Министерство энергетики России рассчитывает, что к 2020 г. их доля составит 4.5%. Не так-то просто «слезть с газо-угольно-нефтяной иглы»! С сожалением приходится констатировать, что упомянутый в начале этого абзаца «ключевой механизм» в ближайшие десятилетия вряд ли сможет обеспечить достижение заявленных в Парижском соглашении целей.

В заключение позволим себе чуть вольную интерпретацию. У современного климата наблюдается повышенная температура. Пока это, конечно, не смертельно, но требует лечения. Если оперативно не найти эффективного лекарства, заболевание грозит стать хроническим. К сожалению, современных «парижских рецептов» недостаточно. А в том, чтобы климат «выздоровел» как можно скорее, заинтересованы миллиарды жителей Земли. Ради этого стоит постараться!■

\* <http://utmagazine.ru/posts/10560-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-7-energetika>

## Литература

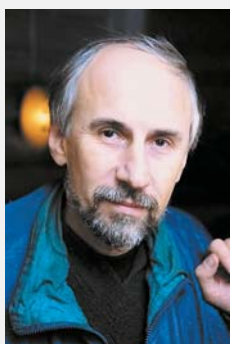
1. Бялко А.В. Парижское соглашение по климату: реальны ли цели? // Природа. 2016. №3. С.3–10.
2. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F.Stocker, D.Qin, G.-K.Plattner et al. // IPCC 2013. Climate Change 2013. Cambridge; N.Y., 2013. Doi: 10.1017/CBO9781107415324.
3. Кароль И.Л., Киселев А.А. Климат будущего: взгляд из настоящего // Природа. 2011. №1. С.3–9.
4. Кароль И.Л., Киселев А.А. Парадоксы климата. М., 2013.
5. Кароль И.Л., Киселев А.А. Суета вокруг сажки // Природа. 2013. №6. С.3–11.
6. Olivier J.G.J., Janssens-Maenbout G., Muntean M., Peters J.A.H.W. Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2015 Report ([http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news\\_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf)).
7. Изменения климата, 2007 г. // Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Ред. Р.К.Пачаури, А.Райзингер и др. Женева, 2007.
8. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год. М., 2016.
9. Рамочная конвенция об изменении климата. 2015 (<http://scientificrussia.ru/data/shared/2015/12/109r.pdf>).
10. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds J.T.Houghton, Y.Ding, D.J.Griggs et al. // IPCC 2001. Climate Change 2001. Cambridge, 2001.
11. Hansen J., Kharecha P., Sato M. et al. Assessing «Dangerous climate change»: required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature // PLoS ONE. 2013. V.8. №12. e81648. Doi: 10.1371/journal.pone.0081648.
12. Knutti R., Rogelj J., Sedláček J., Fischer E.M. A scientific critique of the two-degree climate change target // Nature Geoscience. 2016. V.9. P.13–18. Doi: 10.1038/ngeo2595.
13. Lewis S.L. The Paris Agreement has solved a troubling problem // Nature. 2016. V.532. P.283.
14. Schleussner C.-F., Lissner T.K., Fischer E.M. et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5°C and 2°C // Earth System Dynamics. 2016. V.7. P.327–351. Doi: 10.5194/esd-7-327-2016.
15. Ekholm T., Lindroos T.J. An analysis of countries' climate change mitigation contributions towards the Paris agreement. 2015 ([www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T239.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T239.pdf)).
16. Boyd R., Turner J.C., Ward B. Intended nationally determined contributions: what are the implications for greenhouse gas emissions in 2030? 2015 ([www.ccecep.ac.uk/wp-content/uploads/2015/10/Boyd\\_Turner\\_and\\_Ward\\_policy\\_paper\\_October\\_2015.pdf](http://www.ccecep.ac.uk/wp-content/uploads/2015/10/Boyd_Turner_and_Ward_policy_paper_October_2015.pdf)).
17. Rogelj J., Elzen M.den, Höhne N. et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C // Nature. 2016. V.534. P.631–639. Doi: 10.1038/nature18307.
18. Sanderson B., Tebaldi C., O'Neill B. What would it take to achieve the Paris temperature targets? // Geophysical Research Letters. 2016. V.43. Doi: 10.1002/2016GL069563.
19. Matter J.M., Stute M., Snæbjörnsdóttir S.O. et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions // Science. 2016. V.352. №6291. P.1312–1314.
20. DeCicco J.M., Liu D.Y., Heo J. et al. Carbon balance of U.S. biofuel production and use // Climate Change. 2016. P.1–14.

# Микробиота пожилых: исток долголетия

А.Н.Суворов

Человек вместе со способностью мыслить приобрел в качестве неприятной нагрузки страх смерти. Мы осознали конечность своего существования очень давно, и, естественно, возникло желание это изменить. Достаточно вспомнить о молодильных яблочках, живой воде, купании в трех котлах в сказке про Конька-Горбунка и т.д. Умирать решительно никому не хочется, поэтому и в наши дни ведутся упорные поиски золотой пилюли, эликсира бессмертия или еще чего-либо столь же невероятного, на что тратятся, к слову, немало интеллектуальных и финансовых ресурсов. Однако даже реальные достижения современной науки, будь то пересадка органов и тканей, эффективные лекарственные препараты, стволовые клетки, генотерапия и т.д., не позволяют обесмертить человека, но спасают жизнь и продлевают ее. Достаточно сказать, что только с введением мер санитарии и гигиены, с появлением антибиотиков и вакцин средняя продолжительность жизни возросла вдвое. Разумнее в наше время говорить не о бессмертии, а о продлении жизни и о долголети.

Еще около полувека назад И.И.Мечников предлагал в борьбе за продолжительность жизни обратить внимание на мир бактерий [1]. Он считал, что причина преждевременного старения



**Александр Николаевич Суворов**, член-корреспондент, доктор биологических наук, руководитель отдела молекулярной микробиологии Института экспериментальной медицины (Санкт-Петербург). Занимается исследованием молекулярных механизмов патогенности бактерий, в частности факторов вирулентности стрептококков, а также изучением свойств пробиотиков и механизмов, обеспечивающих их действие.

**Ключевые слова:** кишечная микробиота, люди пожилого возраста, замедление старения.

**Key words:** intestinal microbiota, elderly people, slow aging.

заключается в токсических веществах, которые вырабатывают кишечные бактерии, и даже предлагал радикально с этим бороться, удаляя часть толстой кишки. Мало кто знает, что у Мечникова были решительно настроенные сторонники среди врачей, которые проводили резекцию части кишечника с профилактическими целями. История умалчивает, как долго жили прооперированные, но вполне очевидна ошибочность такого подхода. Однако идеи Мечникова о значении бактерий для здоровья и долголетия оказались верными, что полностью подтвердили данные современной науки\*.

## Микробиом человека

Микромир человека представлен многочисленными микробными сообществами бактерий, вирусов и грибов\*\*. На поверхности кожи, в ротовой полости и кишечнике, в легких и урогенитальных органах обитают сотни видов микроорганизмов. Наиболее представительный микробиоценоз человека по количеству микроорганизмов — в кишечнике: только количество бактерий в нем в 100 раз превосхо-

\* Подробнее см.: Суворов А.Н. Полезные микробы — кто они? // Природа. 2009. №7. С.21–30.

\*\* Подробнее см.: Суворов А.Н. Мир микробов и человек // Природа. 2015. №5. С.11–19.

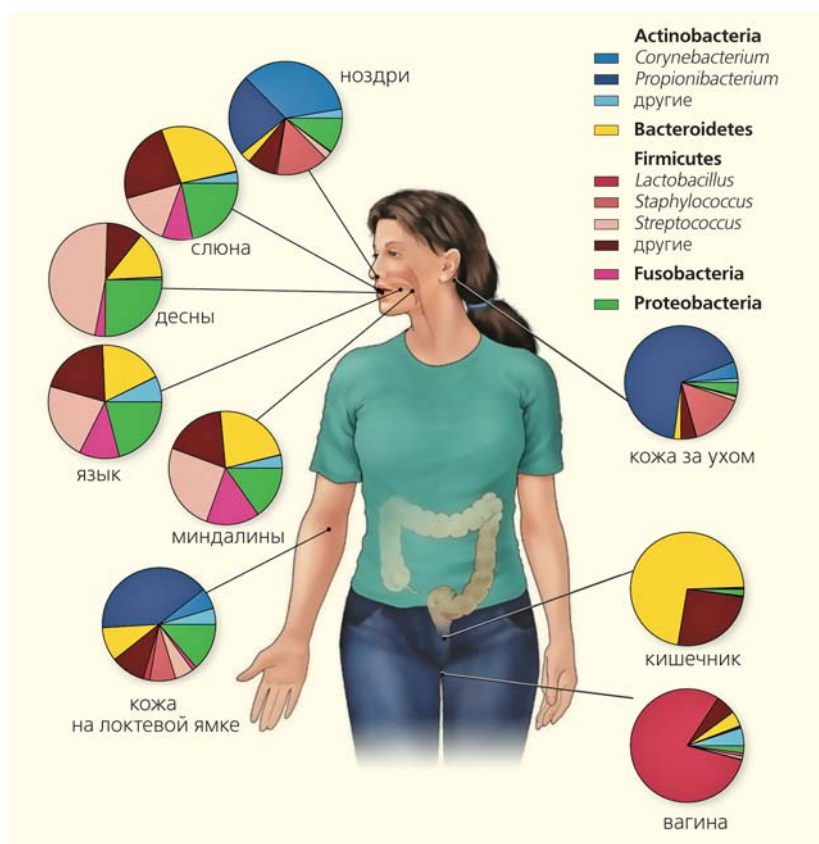


дит число собственно клеток человека. Помимо бактерий в человеке находится не меньшее, а скорее большее число вирусов, грибов и простейших. Эти сложные сообщества из отдельных штаммов микроорганизмов с их индивидуальным генетическим аппаратом составляют микробиом, который существенно превосходит геном самого человека. А все эти микробные гены в совокупности обеспечивают синтез большого набора веществ (метаболома), важных для существования не только микроорганизмов, но и их хозяина. Среди метаболитов бактерий — витамины, короткоцепочечные жирные кислоты, антимикробные пептиды, гормоны и др.

Большинство современных данных о микробном разнообразии микробиоты к настоящему времени были собраны посредством секвенирования ДНК образцов микробиоты с использованием приборов для определения нуклеотидных последовательностей. Появление секваторов нового поколения (new generation sequencing, NGS), выпущенных на рынок в последнее десятилетие, существенно ускорило сбор информации.

Сведения о микробном составе получают либо в результате изучения уникальных участков в области кодирования рибосомной РНК бактерий, либо посредством биоинформатического анализа всего комплекса генов в образце (метагенома). Анализ данных микробиоты людей осуществляется в рамках нескольких масштабных национальных и мультинациональных научных программ: Human Microbiome, MetaHIT, Metagenomics of the Human Intestinal Tract, MicroObes, Human Intestinal Microbiome in Obesity and Nutritional Transition, Data Analysis and Coordination Center и др. Существует специальная программа ELDERMET по изучению микробиоты пожилых (старше 65 лет) людей, которую финансирует правительство Ирландии. В результате работ по этим проектам, а также большого количества независимых исследований накоплен довольно большой объем данных о составе микробиоты у людей разного возраста.

К настоящему времени стало очевидно, что большинство (более 90%) бактерий, обитающих в кишечнике взрослого человека, относятся к двум таксонам — фирмикутам (Firmicutes) и бактеридам (Bacteroidetes). Их соотношение рассматривается в качестве одного из наиболее важных показателей состояния кишечной микробиоты.



Состав микробиоты в разных частях тела человека [2].

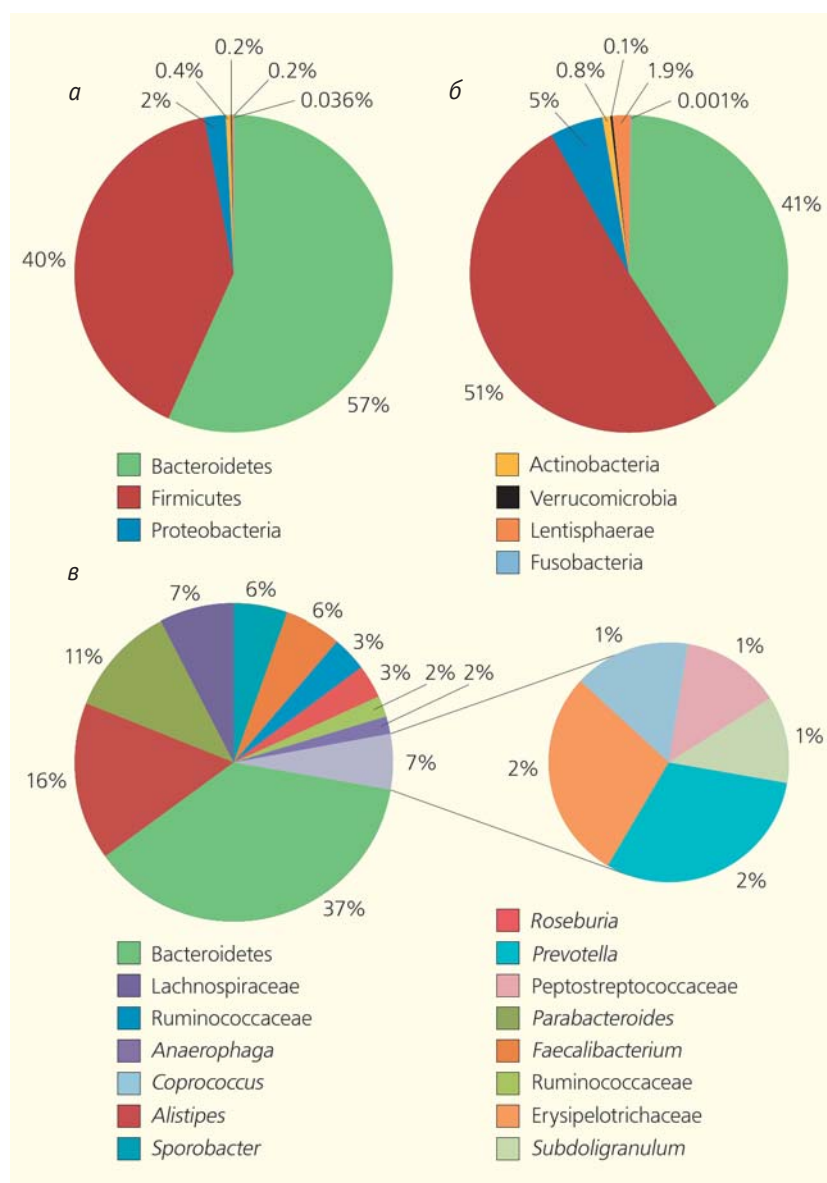
В существенно меньшем количестве (1–5%) обнаруживаются в кишечнике актинобактерии (Actinobacteria), фузобактерии (Fusobacteria), протеобактерии (Proteobacteria), а также еще два недавно открытых типа бактерий — Verrucomicrobia и Lentisphaerae.

Из фирмикутов наиболее многочисленны бактерии рода клостридий (*Clostridium*), которых разделяют по строению генома на кластеры IV и XIV типов). В классе клостридий (Clostridia) выделяют еще два рода — фекалобактерии (*Faecalibacterium*) и руминококки (*Ruminococcus*), которые также считаются важным компонентом кишечной микробиоты здорового человека.

Описанные соотношения кишечных бактерий характерны и для молодых людей, и для пожилых, однако к настоящему времени выявлены определенные возрастные особенности.

## Возрастные изменения состава микробиоты

По существующим на сегодня представлениям, человек рождается практически свободным от микробиоты. Первыми колонизаторами кишечника ребенка (в случае естественных родов) становятся аэробные и некоторые анаэробные бактерии мик-



Совокупный состав микрофлоры у людей пожилого (а, в) и молодого возраста (б); на уровне типа бактерий (а, б) и на уровне рода (в) [5].

робиоты кишечника матери, которые новорожденный получает при прохождении по родовым путям\*. Эти представления в самое последнее время подвергаются сомнению. Появились исследования микробиомов женского молока и плаценты, что указывает на проникновение бактерий в лимфу и через плацентарный барьер [3].

Постепенно в процессе грудного вскармливания в микробиоте начинают доминировать анаэробы с существенным представительством (10–15% от общего микробного числа) актиномицетов (семейства бифидобактерий, *Bifidobacteria*).

\* Подробнее см.: Суворов А.Н. Микробиота детей // Природа. 2011. №8. С.14–21.

Микробиота кишечника детей, появившихся на свет в результате кесарева сечения, существенно отличается — она более сходна с микробиотой кожи и ротовой полости. У таких детей тоже увеличивается количество бифидобактерий, но существенно медленнее и отличается по видовому разнообразию.

Первичная колонизация микроорганизмами (на которой сказывается не только способ появления на свет, но и прием антибиотиков матерью, степень доношенности плода, а также характер кормления) крайне важна для дальнейшего развития ребенка, а также спектра заболеваний, которые его настигнут во взрослом возрасте [4].

После завершения периода грудного вскармливания состав микробиоты вновь меняется, что характеризуется снижением общего числа бифидобактерий до 1–2%. Примерно с двухлетнего возраста у человека формируется его индивидуальная микробиота с примерно равным соотношением фирмикутов и бактериоидов, характерным для взрослых людей. К пожилому возрасту количество фирмикутов несколько снижается до — 30–45% от общего микробного состава, а бактериоидов — возрастает до 50–70%, при этом незначительно, но достоверно увеличивается число протеобактерий (в среднем до 2–3%).

У большинства пожилых людей начинает доминировать кластридии кластера IV над кластером XIVa [5]. К 90–100-летнему

возрасту в кишечнике увеличивается количество бактерий родов *Roseburia* и *Escherichia* при уменьшении общего количества *Lactobacillus*, *Faecalibacterium*, *Parabacteroides*, *Butyrivimonas*, *Coprococcus*, *Megamonas*, *Mitsuokella*, *Sutterella* и *Akkermansia*. Микробное разнообразие человека с возрастом снижается.

Изменения в составе кишечной микробиоты связаны с такими патологиями, как диабет, ожирение, синдром раздраженного кишечника и другие воспалительные заболевания. Понятно, что здоровый организм стремится как можно быстрее восстановить присущий ему микробиоценоз, а больному это не удастся, и развивается дисбиотическое состояние. Поэтому со временем индивидуальные

особенности микробиоценоза кишечника начинают проявляться сильнее. Например, у некоторых пожилых людей количество фирмикотов может варьировать от 7% до 94%, бактероидов — от 3% до 92%, а протеобактерий достигать 23% от общего микробного числа [5].

## Функции микробиоты в организме

В процессе эволюции у макроорганизма и его микробиоты сформировался целый комплекс взаимовыгодных процессов. Например, поскольку прием пищи практически всегда сопровождался поступлением существенного количества микроорганизмов, у собственной (индигенной) микробиоты кишечника появилась способность препятствовать колонизации макроорганизма патогенными бактериями. Для этого индигенные бактерии вырабатывают антимикробные пептиды или другие метаболиты с антимикробными свойствами (например, молочную кислоту), а также физически противодействуют колонизации патогенов.

Другое важнейшее для организма человека свойство микробиоты — способность ферментировать компоненты пищи, которые мы не способны усваивать, а также синтезировать некоторые важные для организма вещества. Микробиота вносит существенный вклад в общий метаболизм человека, синтезируя короткоцепочечные жирные кислоты — в частности бутират, который абсолютно необходим для питания кишечного эпителия.

Взаимодействие микробиоты с иммунной системой хозяина оказалось важнейшим фактором становления как врожденного, так и приобретенного иммунитета, обеспечивая толерантность к собственной микробиоте и готовность элиминировать нежелательные, болезнетворные, микроорганизмы.

Из полезных для организма свойств микробиоты можно отметить еще способность к витаминизации и детоксикации организма.

Соответственно, любые нарушения в сложившихся взаимоотношениях между организмом и его микробиотой вызывают дисбиоз. А на его фоне развивается целый ряд заболеваний:

- патологии желудочно-кишечного тракта (синдром раздраженной кишки, неспецифический язвенный колит, болезнь Крона, псевдомембранозный колит);
- иммунопатологические заболевания (ревматоидный артрит, системная красная волчанка, atopический дерматит);
- заболевания обменного характера (диабет I и II типов, ожирение);
- нейродегенеративные заболевания (рассеянный склероз, болезнь Паркинсона, эпилепсия);
- онкозаболевания различного генеза;
- нарушения липидного обмена, атеросклероз сосудов с последующим развитием сердечно-сосудистой патологии.

К слову, недавние исследования показали, что микробиота млекопитающих участвует в метаболизме самых разнообразных веществ, поступающих в организм с пищей [6]. В частности оказалось, что кишечные бактерии виновны в образовании триметиламина (ТМА) и его N-оксида (ТМАО) —

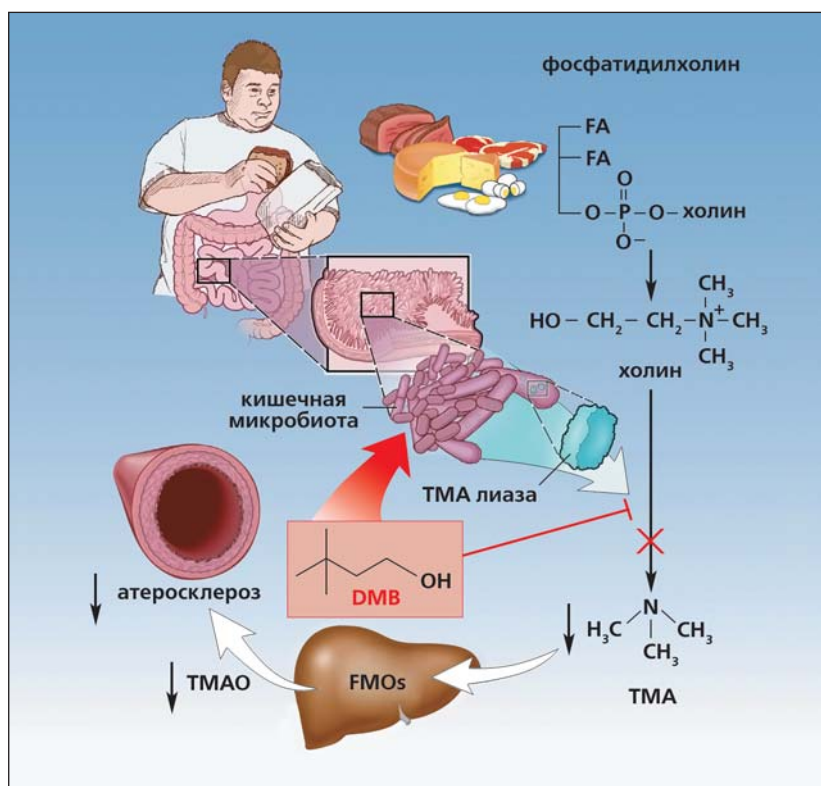


Схема действия 3,3-диметил-1-бутанола (DMB), который исследователи предлагают использовать для лечения атеросклероза — основной причины сердечно-сосудистых заболеваний [6]. Фосфатидилхолин, который в изобилии содержится в мясе, яичных желтках и жирных молочных продуктах, а также холин и триметиламин (ТМА) — биологически активные предшественники для ТМА N-оксида (ТМАО), способствующего развитию атеросклероза. Ингибитор лиазы триметиламина — 3,3-диметил-1-бутанол (DMB) — блокирует производство ТМА кишечными бактериями, что в свою очередь препятствует образованию ТМАО под действием флавинозависимой монооксигеназы (FMOs) печени и, соответственно, развитию атеросклероза.



важных регуляторов обмена жиров в организме и, соответственно, факторов развития атеросклероза. Использование таких безвредных для человека блокаторов синтеза ТМАО, как 3,3-диметил-1-бутанол (DMB), способно в существенной степени замедлить развитие атеросклероза и сопутствующих ему сердечно-сосудистых заболеваний. Данный подход, основанный на поиске мишеней в метаболизме кишечных бактерий, позволяет открыть новую страницу в мировой фармацевтической промышленности.

Совершенно очевидно, что возникновение перечисленных заболеваний (а этот список далеко не полный), индуцированных дисбиозом, не способствует удлинению жизни и улучшению ее качества. Поэтому своевременная борьба с дисбиозом — важнейшее условие достижения долголетия.

В широком смысле формой дисбиоза можно считать любой инфекционный процесс. Патогенный микроорганизм при этом начинается развиваться либо чрезмерно, либо в нетипичном месте. Примеры тому — размножение *Helicobacter pylori* в желудке, вызывающее гастрит, язвенную болезнь и рак желудка, развитие псевдомембранозного колита на фоне пролиферации *Clostridium difficile* или увеличение микробного числа в тонкой кишке при синдроме избыточного бактериального роста.

В настоящее время исследования сконцентрированы на поиске специфических изменений микробиоценоза, сопровождающих развитие патологий. При существующей в современной литературе разрозненности данных о составе микробиоты при различных патологиях к настоящему времени можно выявить несколько закономерностей.

1. На фоне дисбиоза снижается количество бактерий из числа фирмикутов, которые производят бутират, — *Faecalibacterium* spp. и *Ruminococcus* spp. Восстановление состава микробиоты по количеству этих бактерий — прогностически благоприятный признак.

2. Важный показатель возникновения дисбиоза кишечника — снижение биологического разнообразия и общего числа микробов, что наиболее характерно для инфекционных процессов и возрастных изменений микробиоты.

3. Тяжесть дисбиоза наиболее выражено проявляется и плохо компенсируется после длительного использования антибиотиков.

4. При онкологических заболеваниях заметно возрастает число фузобактерий (однако неясно, имеет ли это отношение к развитию патологии).

Нетрудно заметить, что изменения микробного состава при дисбиозе (снижение микробного разнообразия, повышение относительного количества протеобактерий и бактероидов и рост количества условно-патогенных бактерий) во многом сходны с изменениями, возникающими в пожилом и старческом возрасте. Если старость — смертельная болезнь, то начинать лечить ее надо с восстановления микробиоценоза.

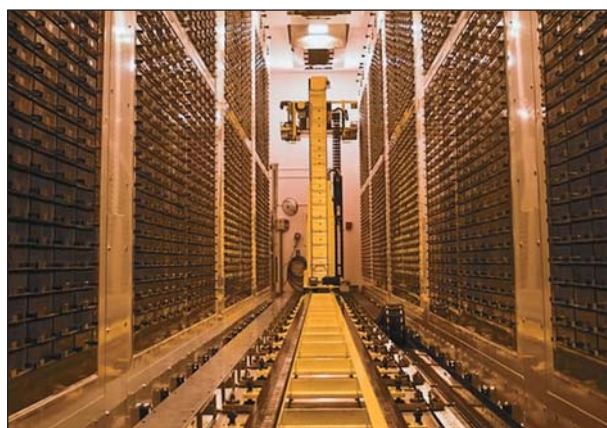
## Профилактика и терапия

Использование микробных препаратов для восстановления микробного баланса кажется вполне логичным. Лечение дисбиозов с использованием микробных продуктов или препаратов, содержащих живые бактерии, — пробиотиков — к настоящему времени наиболее хорошо изучено. Пробиотики, содержащие молочнокислые бактерии (лактобациллы, лактококки и энтерококки), наиболее часто используются при терапии различных патологий, сопровождающихся дисбиозами. Наиболее успешно пробиотики данной группы способствовали восстановлению микробиоценозов кишечника при синдроме раздраженной кишки, неспецифическом язвенном колите, диареях путешественников, аллергиях. Пробиотики на основе энтерококков и лактобацилл оказались эффективными при рассеянном склерозе и хеликобактерных инфекциях желудка. Пробиотики с кишечной палочкой хорошо проявили себя при болезни Крона, а на основе сахаромикетов *Bulardii* и сенной палочки — при дисбиозах на фоне инфекционных заболеваний, например энтеровирусных инфекций. Надо сказать, что в исследованиях эффективность лечения пробиотиками проявилась у людей разных возрастных групп. Наиболее часто применение пробиотиков у пожилых вызывало модуляцию врожденного иммунитета с повышенной экспрессией противовоспалительных цитокинов, при этом вводимые с пробиотиком бактерии меняли метаболизм как самого микробного пула, так и всего комплекса организма и микробиоты. [7].

Справедливости ради замечу, что сдвиги в составе микробиоты на фоне приема пробиотиков были не столь выраженными и при положительной динамике чаще всего характеризовались повышением числа продуцирующих бутират клостридий и собственно тех бактерий, которые входили в состав пробиотиков [8].

Крайне важный фактор воздействия на состав микробиоты — рацион питания. Установлено, что большое содержание в пище животных жиров и белка (диета «западного типа») способствует увеличению числа бактероидов, а еда с большим количеством пищевых волокон — пролиферации бутиратпродуцирующих фирмикутов, преимущественно руминококков [9]. Поскольку с возрастом количество фирмикутов относительно бактероидов снижается, то для восстановления баланса микробиоты могут быть полезны пребиотики на основе плохо ферментируемых полисахаридов. Как оказалось, у столетних стариков количество Ruminococcaceae и Clostridiaceae повышено, а Lachnospiraceae достоверно снижено; вероятно, долголетию этих людей способствовало потребление пищи богатой пищевыми волокнами [10].

Нетрудно заметить, что ахиллесова пята пробиотиков как средства лечения дисбиозов — их чужеродность организму хозяина. Действитель-



но, выращенные вне организма на искусственных питательных средах бактерии могут лишь создать условия для восстановления ранее подавленной собственной микробиоты, но не способны восстановить исчезнувшие из микробиоценоза виды или увеличить микробное разнообразие. Интересной альтернативой пробиотикам стала фекальная трансплантация — процедура, когда микробиота донора «пересаживается» в организм пациента, страдающего дисбиозом [11]. Данный подход наиболее успешно был использован при лечении пациентов с псевдомембранозным колитом, обусловленным *C.difficile*. Часто однократной фекальной трансплантации оказывается достаточно, чтобы существенно сни-



В UK Biobank (Манчестере, Великобритания), созданном для изучения, диагностики, профилактики и лечения таких тяжелых патологий, как рак, сердечно-сосудистые заболевания, диабет, артрит, остеопороз и т.д., хранятся образцы биоматериалов (в том числе и микробиоты), взятых у предварительно проверенных доноров. Каждый образец маркирован 2D-штрихкодом.

Фото с сайта [ukbiobank.ac.uk](http://ukbiobank.ac.uk).

зительность заболевания и спасти жизнь пациента. Однако успешная процедура замены микробиоты одного человека чужой не решает проблемы восстановления собственных бактерий организма, при этом всегда сохраняется риск передачи от донора бактерий или вирусов, действие которых проявится через какое-то время. Избежать нежелательных последствий микробной терапии, связанных с пробиотиками или фекальной трансплантацией, возможно с помощью технологии аутопробиотиков. Оказалось, что собственные бактерии, сохраненные до развития дисбиоза, можно культивировать и вводить с пищей человеку обратно [12]. В этом случае бактерии воспринимаются иммунной системой не как что-то чужеродное, а как естественная часть организма. К настоящему времени аутопробиотики с успехом применяются при заболеваниях желудочно-кишечного тракта и даже для восстановления микробиоты у космонавтов [13].

Сохраненная в криобанках микробиота здоровых молодых людей может стать фактором восстановления юношеской микробиоты в старческом возрасте. Однако формирование национальных банков индивидуальной микробиоты потребует существенных финансовых и организационных усилий.

## Вместо заключения

Выявленные к настоящему времени возрастные отличия микробиоты не отвечают на вопрос о том, насколько ее изменения к пожилому возрасту способствуют или препятствуют долголетию. Напомню, что обнаружена лишь тенденция к повышению содержания одних классов микроорганизмов (бактероидов и протеобактерий) и снижению других (фирмикутов).

Еще одна установленная закономерность микробиоты пожилых — достоверное снижение ее видового и родового разнообразия [9, 14]. Собранные к настоящему времени данные о микробиоте пожилых в рамках проекта ELDERMET (eldermet.ucc.ie), а также не связанных с данной инициативой научных исследований позволяют характеризовать порядка 1000 микробиомов пожилых разных возрастных категорий, но не могут рассматриваться в качестве окончательных.

Могут ли бактерии в кишечнике столетнего аксакала стать золотой капсулой бессмертия или окажутся ядом с отдаленными последствиями, разрушающими организм, до сих пор неясно. Ответы на данный вопрос появятся нескоро. Наиболее вероятно, что, как и в большинстве случаев, ответы эти не будут однозначными. Например, повыше-

**Таблица**

**Компании и проекты по изучению микробиоты, направленному на увеличение продолжительности жизни [15].**

Компания / Местонахождение	Основные направления	Учредители
<b>Персонализированные «омиксные»* подходы к улучшению самочувствия и/или увеличению продолжительности жизни</b>		
Arivale / Сизтл (США)	Мультиомиксный анализ и разработка на его основе рекомендаций для пациента по улучшению состояния здоровья	Lee Hood, Clayton Lewis, Nathan Price
Calico / Сан-Франциско (США)	Замедление старения и смягчение возрастных заболеваний	Google Inc., Arthur Levinson
DayTwo / Аданим (Израиль)	Составление индивидуальной диеты для поддержания нормального уровня сахара в крови	Marius Macht, Yuval Ofek, Lihi Segal
Google Baseline / Маунтин-Вью (Калифорния, США)	Определение основных параметров здорового организма человека	Google Inc., Andrew Conrad
Human Longevity / Сан-Диего (США)	Создание базы данных генетики человека, фенотипов и клинических данных	Craig Venter, Robert Hariri, Peter Diamandis
<b>Персонализированные микробиологические анализы</b>		
American Gut / Сан-Диего (США)	Создание общедоступного ресурса для размещения результатов анализа индивидуальных микробиомов	Rob Knight, Jeff Leach
Enterome / Париж (Франция)	Определение особенностей микробиома при воспалении кишечника и безалкогольном ожирении печени	Peer Bork, Dusko Ehrlich
Second Genome / Сан-Франциско (США)	Поиск новых способов терапии, основанных на результатах изучения микробиомов	Janet Warrington, Todd DeSantis
Seres Health / Кембридж (Массачусетс, США)	Разработка терапии на основе данных анализа микробиомов	Geoffrey von Maltzahn, David Berry, Noubar Afeyan
Vedanta Biosciences / Бостон (США)	Развитие методов терапии, учитывающей взаимодействие микробиома и иммунной системы человека	Ruslan Medzhitov, Dan Littman, Alexander Rudensky, Brett Finlay, Kenya Honda, David Steinberg

\* Неологизмом «omics» в англоязычной литературе неофициально обозначаются исследования в области биологии — такие как геномика, протеомика, метаболомика и др. Мультиомиксные исследования направлены на комплексное изучение функционирования клеток, тканей, организма или организмов.



ние числа протеобактерий, обеспечивающих противовоспалительные сдвиги иммунной системы, может обуславливать развитие иммунопатологий, свойственных заболеваниям в случае хронического воспаления. Однако, с другой стороны, такая стимуляция может быть полезной в условиях естественной возрастной инволюции иммунной системы. Другая сложность в оценке микробиотного состава у пожилых — общее нарастание соматических патологий с возрастом. Можно ли рассматривать изменения микробиоты у пожилых как благоприятствующий долголетию симптом или, напро-

тив, как патологический? Было бы заманчиво, сохранив микробиоту здоровых людей в молодом возрасте, заменить ею микробиоту в старости. Для этого целесообразно заблаговременно осуществлять депонирование микробиоты в биобанки, как это делают с кровью, спермой и стволовыми клетками.

И все же однотипные тенденции в изменении микробиоты с возрастом позволяют надеяться на появление новых рекомендаций по микробной терапии для поддержания здоровья и долголетия в недалеком будущем. ■

## Литература

1. Мечников И.И. Этюды оптимизма. М., 1964.
2. Grice EA, Segre JA. The human microbiome: our second genome // Annual Review of Genomics and Human Genetics. 2012. V.13. P.151–170. Doi:10.1146/annurev-genom-090711-163814.
3. Prince AL, Chu DM, Seferovic MD, et al. The perinatal microbiome and pregnancy: moving beyond the vaginal microbiome // Cold Spring Harb. Perspect. Med. 2015. V.5. №6. Doi:10.1101/cshperspect.a023051.
4. Goulet O. Potential role of the intestinal microbiota in programming health and disease // Nutr. Rev. 2015. V.73. P.32–40. Doi:10.1093/nutrit/nuv039.
5. Claesson MJ, Cusack S, O'Sullivan O, et al. Composition, variability, and temporal stability of the intestinal microbiota of the elderly // PNAS. 2011. V.108. Suppl.1. P.4586–4591. Doi:10.1073/pnas.1000097107.
6. Wang Z, Roberts AB, Buffa JA, et al. Non-lethal inhibition of gut microbial trimethylamine production for the treatment of atherosclerosis // Cell. V.163. P.1585–1595. Doi:10.1016/j.cell.2015.11.055.
7. Elie-Fadrosh EA, Brady A, Crabtree J, et al. Functional dynamics of the gut microbiome in elderly people during probiotic consumption // mBio. 2015. V.6. e00231-15. Doi:10.1128/mBio.00231-15.
8. Nyangale EP, Farmer S, Cash HA, et al. Bacillus coagulans GBI-30, 6086 modulates *Faecalibacterium prausnitzii* in older men and women // J. Nutr. 2015. V.145. P.1446–1452. Doi:10.3945/jn.114.199802.
9. Wang F, Yu T, Huang G, et al. Gut microbiota community and its assembly associated with age and diet in Chinese centenarians // J. Microbiol. Biotechnol. 2015. V.25. P.1195–1204. Doi:10.4014/jmb.1410.10014.
10. Claesson MJ, Jeffery IB, Conde S, et al. Gut microbiota composition correlates with diet and health in the elderly // Nature. 2012. V.488. P.178–184. Doi:10.1038/nature11319.
11. Choi HH, Cho YS. Fecal microbiota transplantation: current applications, effectiveness and future perspectives // Clin. Endosc. 2016. V.49. P.257–265. Doi:10.5946/ce.2015.117.
12. Suworov A. Gut microbiota, probiotics and human health // Biosci. Microbiota Food Health. 2013. V.32. C.81–91. Doi:10.12938/bmfh.32.81.
13. Ильин В.К., Суворов А.Н., Кирюхина Н.В. и др. Аутопробиотики как средство профилактики инфекционно-воспалительных заболеваний у человека в искусственной среде обитания // Вестник РАМН. 2013. №2. С.56–62.
14. Saraswati S, Sitaraman R. Aging and the human gut microbiota — from correlation to causality // Front. Microbiol. 2015. V.5. Article 764. Doi:10.3389/fmicb.2014.00764.
15. McDonald D, Grishman G, Price ND. Personalized nutrition through big data // Nat. biotechnol. 2016. V.34. P.152–154. Doi:10.1038/nbt.3476.



# С Луны на Землю: новые данные о пироксеноидах

Р.К.Расцветаетева, Н.В.Щипалкина, С.М.Аксенов

**П**ироксены и близкие к ним пироксеноиды образуют важные минеральные семейства силикатов. Они широко распространены и служат породообразующими минералами для целого ряда магматических, метаморфизованных осадочных и вулканогенно-осадочных пород, а также встречаются в вулканитах и гидротермальных образованиях.

Но эти минералы распространены не только на Земле, они найдены и на Луне. Американские аппараты «Аполлон-11 и -17» и советские «Луна-16 и -20» доставили с Луны на Землю сотни килограммов горных пород. Практически все лунные минералы имеют земные аналоги, а некоторые из них даже открыты раньше. Например, армолколлит ( $\text{Mg,Fe}^{2+}\text{Ti}_2\text{O}_5$ ), который назвали в честь астронавтов (Н.О.Армстронга, Э.Ю.Олдрина и М.Коллинза), собравших коллекцию образцов на Луне, позднее был обнаружен на Урале и на Кольском п-ове. Еще один минерал, транквиллитит  $\text{Fe}_8^{3+}(\text{Zr, Y})_2\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{O}_{24}$ , названный по месту находки в Море Спокойствия, дольше всех считался исключительно лунным, но через 40 лет его все же нашли в Австралии. И, как заметили авторы находки, он «последним вернулся на Землю» [1].

Лунные пироксены и пироксеноиды встречаются в эффузивных магматических породах



**Рамиза Кераровна Расцветаетева**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института кристаллографии и фотоники имени А.В.Шубникова РАН, соавтор открытий более 75 новых минералов. Область научных интересов — структурная минералогия, кристаллохимия, рентгеноструктурный анализ. Постоянный автор «Природы».



**Надежда Васильевна Щипалкина**, магистрант кафедры минералогии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов охватывает вопросы минералогии и рентгеноструктурного анализа.



**Сергей Михайлович Аксенов**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник того же института. Специалист в области кристаллохимии и рентгеноструктурного анализа минералов.

**Ключевые слова:** рентгеноструктурный анализ, пироксеноиды, новые минералы, лунные минералы, пироксферроит, мэндингит, феррородонит.

**Key words:** X-ray analysis, pyroxenoids, new mineral species, moon minerals, pyroxferroite, mendigite, ferrohodonite.

впадин морей. Среди них — обедненный марганцем пироксмангит. Примечательно, что этот пироксеноид, названный пироксферроитом, впервые обнаружили в 1969 г. именно в образцах из Моря Спокойствия во время миссии «Аполлон-11» и только потом нашли на Земле: в шахте Исанаго, префектуре Киото (Япония), в штате Южная Каролина (США), в провинции Верmland (Швеция) и в Финляндии.

Первые структурные исследования пироксеноидов относятся к 1928 г. и на сегодняшний день составляют сотни публикаций. Однако за последние 30–35 лет количество работ по минералам этой группы существенно сократилось. Но наши недавние исследования показали, что даже наиболее распространенные представители групп бустамита, родонита и пироксмангита изучены недостаточно полно и требуют пересмотра и уточнения их химического состава и структуры.

### Похожие снаружи, но разные внутри

Макроскопически пироксеноиды трудно диагностируются, что подтверждается результатами нашей работы с образцами бустамитов, родонитов и пироксмангитов из коллекций Минералогического музея имени А.Е.Ферсмана РАН. Так, около половины образцов, этикетированных в музее как бустамит, по результатам инфракрасной спектроскопии были переопределены как родонит. Результаты инфракрасной спектроскопии подтвердились и данными электронно-зондового микроанализа. Провести четкие химические границы между минералами этих групп (которые к тому же нередко образуют тонкие сростания, в том числе на микроуровне) также нельзя. Для их однозначного определения необходимо использовать комплексную методику диагностики. Наиболее экспрессным и надежным диагностическим «инструментом» может стать сочетание инфракрасной спектроскопии и электронно-зондового микроанализа. Поскольку для этих минералов возможно разное соотношение и разные способы упорядочения главных (Ca, Mn, Fe) и примесных (Mg, Zn) катионов, для детального изучения особенностей распределения данных элементов по позициям в структуре наиболее подходящим методом можно считать рентгеноструктурный с последующим кристаллохимическим анализом монокристаллов. Хо-

тя монокристалльная рентгенография очень полезна, ее применение нередко затруднено. Такие минералы часто не образуют кристаллов, пригодных для изучения этим методом. Железосодержащие образцы дополнительно изучаются с помощью мёссбауэровской спектроскопии (ядерного гамма-резонанса — ЯГР).

Группа пироксена и семейство пироксеноидов объединяют структурно родственные минералы и синтетические соединения с формулой  $M_x^{2+}[\text{Si}_x\text{O}_{3x}]$ , где  $M = \text{Ca, Mn, Fe, Mg}$ . Основа их структуры — кремнекислородные цепочки с разным периодом повторяемости [2]. О пироксеновых и пироксеноидных цепочках мы уже писали на страницах «Природы»\*. Если в пироксеновых цепочках с  $x = 2$  (период повторяемости два тетраэдра) чередуются тетраэдры  $[\text{SiO}_4]$  двух ориентаций, то в пироксеноидах (для которых период повторяемости  $x \geq 3$ ) чередуются в разных пропорциях диортогруппы  $[\text{Si}_2\text{O}_7]$  и тетраэдры  $[\text{SiO}_4]$ . В минералах группы бустамита цепочки состоят из диортогрупп и тетраэдров в соотношении 1:1 и периодом повторяемости три тетраэдра (1:1 и 3). Более сложные конфигурации цепочек формируются в родоните (2:1 и 5) и в пироксмангите (3:1 и 7) (рис.1). Кроме цепочек с нечетной периодичностью известны силикаты с цепочками четной периодичности. Они характеризуются дополнительными искажениями (сжатием или растяжением, скручиванием и изогнутостью). Найдены цепочки с периодом повторяемости 4 тетраэдра (батисит,

\* Расцветаева Р.К. Конкурс красоты // Природа. 2005. №4. С.26–32.

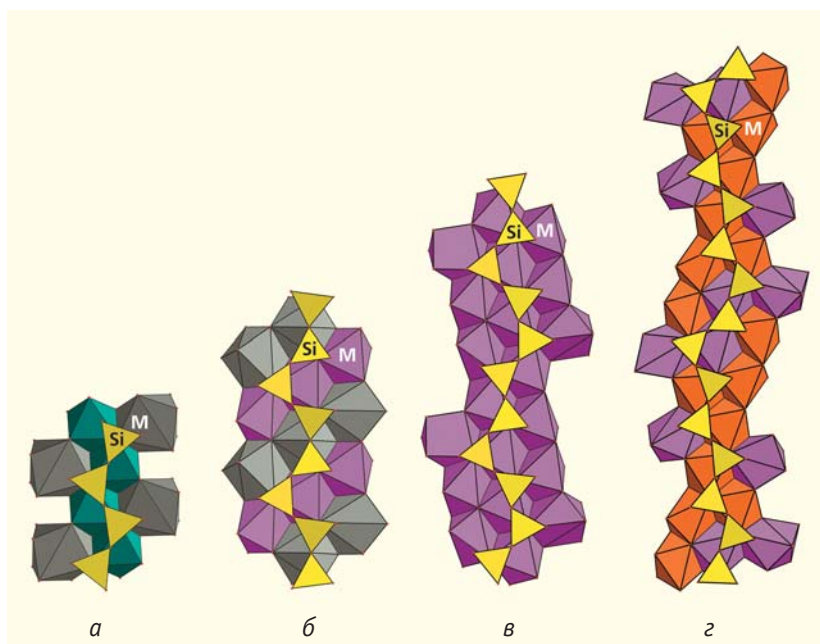


Рис.1. Структурные типы пироксена (а), бустамита (б), родонита (в) и пироксмангита (г).

харадаит, краускопфит), 6 (стокезит), 12 (аламозит) и даже 24 (правда, в синтетическом соединении  $\text{Na}_{24}\text{Y}_8[\text{Si}_{24}\text{O}_{72}]$ ). Удлинение звена цепочки с нечетной периодичностью приводит к возрастанию *c*-параметра ячейки вдоль оси цепочки от ~5 до ~23 Å, а в цепочках с четной периодичностью (из-за их изогнутости) — до ~15 Å.

Катионные полиэдры в структуре пироксеноидов (преимущественно октаэдры  $\text{MO}_6$ ), объединяясь между собой ребрами, образуют двух-трехрядные ленты, которые располагаются в шахматном порядке. Они идут вдоль кремнекислородных цепочек и, объединяясь с ними, формируют плотный гетерополиэдрический каркас. Таким образом, каждой структурной группе пироксеноидов соответствует свой мотив не только тетраэдрический, но и *M*-катионный (см. рис.1). Разнообразие же минеральных видов в пределах группы обуславливается как составом катионов, так и индивидуальными особенностями их распределения по *M*-позициям.

Химический состав представительной коллекции из нескольких десятков образцов мы определяли с помощью электронного микроскопа Jeol 6480lv, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy-350. Для рентгеноструктурного анализа были отобраны восемь образцов. Наиболее интересными мы посчитали минералы из группы бустамита, родонита и пироксмангита, которые отличаются высоким содержанием марганца, железа, а в случае пироксмангита и пироксферроита еще и существенными количествами Mg и Ca. Эти минералы были найдены в щелочных вулканитах Айфеля (земля Рейнланд-Пфальц, Германия) и метаморфических породах Брокен-Хилла (Австралия). Район молодого вулканизма Айфеля известен редкими минералами. Многие из них были открыты впервые. Минералы групп бустамита, родонита и пироксмангита образовались на контакте пористых и плотных базальтовых лав и рыхлых и закаленных пеплов. Брокен-Хилл — крупнейшее полиметаллическое месторождение, расположенное на западе Нового Южного Уэльса. Его вулканогенно-осадочные руды существенно обогащены марганцем, что привело к значительному развитию там марганцевой минерализации.

Экспериментальный набор интенсивностей для рентгеноструктурного анализа получен в полной сфере обратного пространства на современных дифрактометрах Xcalibur Oxford Diffraction и Bruker SMART APEX2, оснащенных двухкоординатными CCD-детекторами.

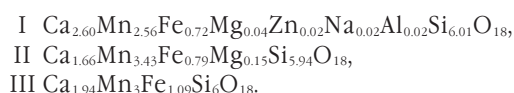
В связи со сложным химическим составом распределение катионов по позициям проводилось на основе кристаллохимических критериев (межатомных расстояний и ионных радиусов катионов) с использованием смешанных кривых атомного рассеяния и контролировалось расчетом *R*-фактора достоверности.

## Мендигит

Породообразующий бустамит  $\text{Ca}_3\text{Mn}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]_2$ , как и волластонит  $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ , представляет собой триклинные пироксеноиды с трехчленной цепочкой кремнекислородных тетраэдров. Хотя кремнекислородные цепочки в их структурах одинаковы, минералы различаются не только составом, но и расположением этих цепочек, сочлененных с октаэдрической лентой (рис.2).

Бустамит встречается в виде радиально-лучистых и волокнистых агрегатов, призматических кристаллов и сплошных масс розового, коричневого, серовато-розового, розовато-желтого цвета. В литературе под общим названием «бустамит» описываются образцы с широко варьирующими отношениями  $\text{Ca}:\text{Mn}:\text{Fe}$  и с разными схемами их упорядочения по позициям структуры [3]. Кроме собственно бустамита  $\text{Mn}_2\text{Ca}_2\text{MnCa}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$  известны еще высококальциевый (Са-бустамит)  $\text{Ca}_2\text{Ca}_2\text{MnCa}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$  и высокожелезистый (ферробустамит)  $\text{Ca}_2\text{Ca}_2(\text{Fe},\text{Ca})(\text{Ca},\text{Fe})(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$  [4–6]. В поисках бустамита с необычным составом мы выполнили анализы десятков образцов из коллекций Минералогического музея, собранных на месторождениях Австралии, Болгарии, Великобритании, Германии, Италии, Казахстана, Мексики, России, США, Таджикистана и Швеции. В результате выяснилось, что количество атомов Fe в бустамите варьирует от 0.00 до 1.09 на формулу, Ca — от 1.02 до 5.06, Mn — от 0.48 до 4.51, Mg — от 0.00 до 0.31 и Zn — от 0.00 до 0.20.

Для рентгеноструктурного анализа мы отобрали четыре образца бустамита — один из Айфеля и три железосодержащих (>0.7 атома Fe на формулу) образца коричневатого-розового цвета из Брокен-Хилла со следующими формулами:



Предстояло выявить особенности этих минералов по сравнению с высокожелезистым бустамитом (ферробустамитом), исследованным в 1973 г. [6].

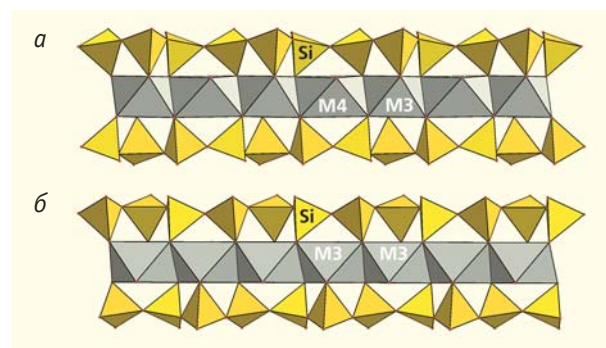


Рис.2. Сочленение кремнекислородных цепочек с октаэдрическими лентами в бустамите (а) и волластоните (б).

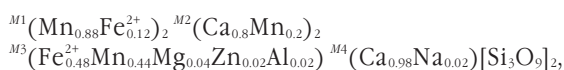


Все проанализированные образцы характеризовались близкими значениями параметров триклинных ячеек, которые изменялись в узких пределах:  $a = 7.089\text{--}7.130$ ,  $b = 7.637\text{--}7.694$ ,  $c = 7.699\text{--}7.734$  Å,  $\alpha = 79.24\text{--}79.58$ ,  $\beta = 62.62\text{--}62.95$ ,  $\gamma = 76.15\text{--}76.47$ ,  $V = 359.29\text{--}365.49$  Å<sup>3</sup>. Для них были получены дифракционные эксперименты в полной сфере обратного пространства с большим количеством отражений (вплоть до 19 616). В уточненных структурах  $R$ -факторы достоверности не превышали 5.87%, что свидетельствует в том числе и о достаточно хорошем качестве отобранных монокристаллов.

Бустамит — диморф волластонита (т.е. оба минерала имеют одинаковый состав). Однако их структуры различаются числом катионных позиций. В бустамите вместо трех  $M$ -позиций со средними расстояниями катион—анион 2.4 Å содержатся четыре [5]. Мы должны были выяснить распределение катионов по позициям  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$  и  $M4$  с одинаковыми (за исключением  $M4$ ) координационными числами, равными шести. Задача усложнялась тем, что как основные, так и примесные катионы обладали достаточно близкими ионными радиусами.

Нам удалось установить, что наибольший по объему  $M4$ -восьмивершинник (со средним расстоянием  $M\text{--}O = 2.500$  Å) в структуре *образца I* полностью заселен кальцием (как и в других минералах группы бустамита). Кальций преобладал и в октаэдрической  $M2$ -позиции со средним расстоянием  $M\text{--}O = 2.368$  Å, которая заселена 0.8 атомов Ca и 0.2 атомов Mn. В позиции  $M1$  атомы Mn находятся в шестерной координации из атомов кислорода со средним расстоянием катион—кислород 2.229 Å. В ней же находится 0.25 атомов железа. Исходя из данных ЯГР, соотношение Fe в двух позициях  $M1$  и  $M3 = 1:2$ , т.е. в самом маленьком  $M3$ -октаэдре со средним расстоянием  $M\text{--}O = 2.185$  Å находится большая часть железа. И здесь же концентрируются примеси магния и цинка.

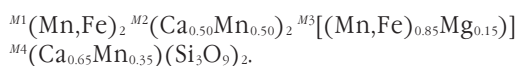
Особенности химического состава и структуры изученного минерала отражены в его кристаллохимической формуле:



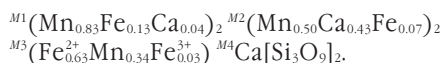
где круглыми скобками последовательно выделены составы полиэдров, а надстрочными символами обозначены их номера. В идеализированном виде формула может быть записана как  $\text{Mn}_2\text{Ca}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ca}[\text{Si}_3\text{O}_9]_2$ , что удобно для сравнения с ферробустамитом  $\text{Ca}_2\text{Ca}_2(\text{Fe},\text{Ca})(\text{Ca},\text{Fe})(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$ . Хорошо видны различия этих высокожелезистых минералов, как в составе, так и в распределении катионов.

Поскольку для *образца II* у нас не было данных мёссбауэровской спектроскопии и мы не могли заранее знать, сколько позиций и в каком соотношении будут занимать атомы Fe, то при распределении катионов пришлось ориентиро-

ваться на расстояния  $M\text{--}O$  в полиэдрах. Полученную кристаллохимическую формулу можно записать в обобщенном виде:

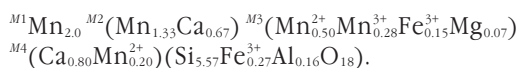


Отличительная особенность *образца III* — распределение Fe (вместе с Mn и Ca) по трем неэквивалентным позициям  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$ , что доказано данными мёссбауэровской спектроскопии. Кристаллохимическую формулу этого образца можно записать как:



Образец из Айфеля отличался сложным химическим составом и высоким содержанием марганца. Его количество, по данным химического анализа, достигало 75%. Помимо примесных катионов нашу задачу усложняло то, что железо и марганец присутствовали в двух степенях окисления.

В результате найденного нами распределения катионов по четырем  $M$ -позициям с учетом расстояний катион—кислород была получена следующая формула минерала:



В идеализированном виде  $\text{Mn}_2\text{Mn}_2\text{MnCa}[\text{Si}_3\text{O}_9]_2$  она позволяет убедиться в оригинальности состава и структуры этого минерала (табл.1). И вот победа! 1 мая 2014 г. Комиссия по новым минералам, номенклатуре и классификации (КНМНК) Международной минералогической ассоциации утвердила (№2014-007) новый минеральный вид (названный по месту находки **мендигитом**) и его название.

Мендигит крайне редок в природе. Он обнаружен в виде пучков длиннопризматических кристаллов темно-коричневого цвета в породе близ города Мендиг (Mendig), который находится недалеко от Лаахерского озера (Laacher See) на террито-

Таблица 1

Состав катионных позиций в изученных минералах со структурным типом бустамита

Минерал	Катионные позиции				Источник
	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	
Бустамит	Mn <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub>	Mn	Ca	[4]
Ферробустамит	Ca <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub>	Fe	Ca	[6]
Са-бустамит	Ca <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub>	Mn	Ca	[5]
Мендигит	Mn <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub>	Mn	Ca	[7]
Высокожелезистый бустамит-I	Mn <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub>	Fe	Ca	[8]
Высокожелезистый бустамит-II	Mn <sub>2</sub>	Ca	Mn	Ca	наши данные
Высокожелезистый бустамит-III	Mn <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub>	Fe	Ca	наши данные



Рис.3. Пучки кристаллов мendigита.

Фото Ш.Вольфсрида

рии вулканического района Айфель (рис.3). Кроме описываемого здесь голотипа известен лишь один природный образец, для которого можно предположить пусть незначительное, но все же преобладание марганца над кальцием в  $M2$ -позиции ( $Mn^{2+}:Ca = 51:49$ ). Минерал найден в линзе марганцевой руды в доломитовом мраморе месторождения Мицука в Японии [5].

Таким образом, структурно изученные минералы группы бустамита позволяют констатировать, что при сохранении общих закономерностей в распределении катионов, которые выражаются в избирательном заселении позиций  $M4$  кальцием и концентрировании малых катионов ( $Fe, Mn$ ) в позиции  $M3$ , для позиций  $M1$  и  $M2$  наблюдаются заметные вариации состава. Если для собственно бустамита характерно упорядоченное заселение всех четырех катионных позиций атомами  $Ca$  и  $Mn$ , то в ферробустамите во всех четырех позициях  $Mn$  отсутствует (или его содержание незначительно). Для  $Ca$ -бустамита характерно заселение кальцием позиций  $M1, M2, M4$ , а в позиции  $M3$  преобладает марганец. В структуре нового минерала мendigита во всех трех позициях ( $M1-M3$ ) преобладает  $Mn$ , а позиция  $M4$ , как и в перечисленных выше минералах, заселена  $Ca$ .

Наше исследование трех высокожелезистых образцов показало, что если образец II не выявил радикальных отличий от собственно бустамита, то два других характеризуются оригинальным сочетанием элементов в трех позициях и могут рассматриваться как потенциально новые виды.

## Феррородонит

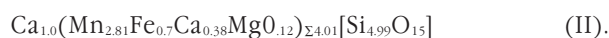
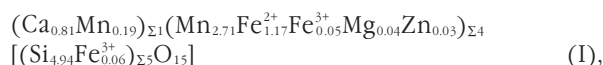
Минералы семейства родонита  $CaMn_n[Si_5O_{15}]$  представляют собой силикаты с цепочками из пятичленных линейных групп кремнекислородных тетраэдров. В периоде повторяемости их цепочек присутствуют две диортогруппы  $Si_2O_7$ , разделенные одним кремнекислородным тетраэдром. Це-

почки соединяются в трехмерный каркас с помощью  $M$ -октаэдров. Для катионов в структуре родонита существуют пять неэквивалентных позиций  $M1, M2, M3, M4, M5$  (см. рис.1).

Родонит кристаллизуется в широком диапазоне температур и давлений. Встречается он преимущественно в метаморфизованных осадочных марганцевых месторождениях в виде таблитчатых, нередко удлинённых, клиновидных кристаллов бледно-розового, ярко-розового, красного, желтоватого, оранжевого, буроватого цвета. Классический регион родонитовых пород — Урал. Используется этот минерал как поделочный камень, и одно из лучших месторождений поделочного родонита — Малосельниковское, к югу от Екатеринбурга.

Структуру родонита можно рассматривать как производную от структуры бустамита с увеличением количества позиций в катионной ленте, что сопровождается дальнейшим искажением кремнекислородной цепочки и увеличением в ней периода повторяемости [9]. В структуру родонита с пятью разнообъемными полиэдрами может входить гораздо большее (по сравнению с бустамитом) количество  $Mn$ , как минимум до 4.66 атома на формулу. Крупный полиэдр  $M5$  имеет сродство в первую очередь с  $Ca$ , а вот собственной позиции  $Fe$  в родоните пока ни в одной из структурных работ не зафиксировано, т.е. железистый аналог родонита достоверно известен не был.

Мы проанализировали более 100 образцов родонита из месторождений разных типов. Вариации содержания катионов на формулу составляли:  $Ca - 0.34-1.86$ ,  $Mn - 2.85-4.66$ ,  $Fe - 0.00-1.28$ ,  $Mg - 0.00-0.68$ ,  $Zn - 0.00-0.43$ . Для рентгеноструктурного анализа отобрали два образца необычного состава (до 14.47 вес.%  $FeO$ ) из месторождения Брокен-Хилл. Химические формулы исследованных минералов соответствуют:



Полученные параметры триклинных ячеек обоих образцов мало отличались друг от друга:  $a = 6.6766(5)$  и  $6.6907(4)$ ,  $b = 7.6754(6)$  и  $7.6712(4)$ ,  $c = 11.803(1)$  и  $11.812(1)$  Å,  $\alpha = 105.5$  и  $105.6$ ,  $\beta = 92.27$  и  $92.29$ ,  $\gamma = 93.92$  и  $93.97^\circ$ ,  $V = 580.4$  и  $581.5$  Å<sup>3</sup>.

После анализа межатомных расстояний в структуре родонита-I (с учетом данных мёссбауэровской спектроскопии) распределение катионов стало очевидным. Для позиции  $M5$  в крупном семивершиннике со средним расстоянием  $M-O = 2.415$  Å была составлена смешанная кривая атомного рассеяния со статистическим заселением атомами  $Ca$  и  $Mn$  при доминировании  $Ca$ . В позициях  $M1, M2, M3$  почти одинаковых по размеру октаэдров со средними расстояниями  $M-O = 2.21-2.22$  Å разместились атомы  $Mn$  с примесью атомов  $Fe$ . В позиции  $M4$ , координированной пятью атомами кислорода,

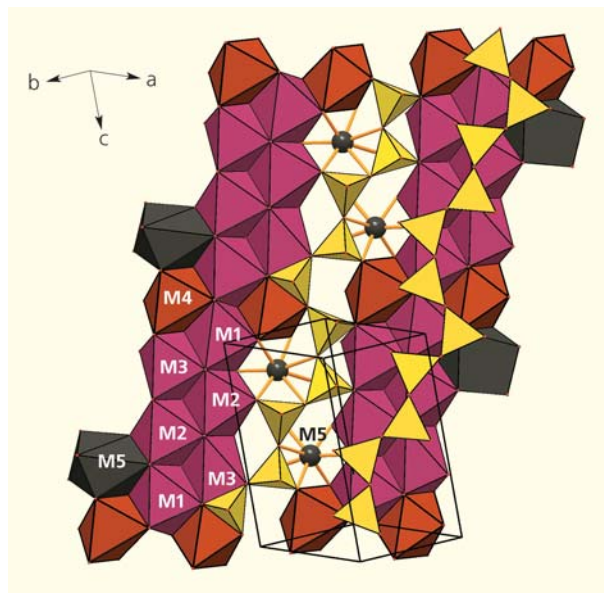
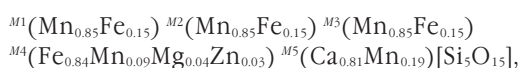


Рис.4. Красные кристаллы ферродонита (до 2 см в поперечнике) в галените PbS (слева) и структура ферродонита. Фото авторов

которые образовали пятивершинник с минимальным средним расстоянием  $M-O = 2.142 \text{ \AA}$ , преобладали атомы Fe. Искривленные полиэдры (семивершинники и пятивершинники) располагались по краям катионной ленты.

Структура *родонита-II* в целом такая же, как и у *родонита-I*. Различия в содержании примесных катионов в той или иной позиции связаны с особенностями химического состава, но из-за близости порядковых номеров и ионных радиусов Fe и Mn достоверно разделить их вклады при отсутствии данных мёссбауэровской спектроскопии невозможно. Поэтому позиции в структуре мы заселили элементами с учетом химического состава без детализации их вкладов. Небольшое количество примесного Mg поместили в самый малообъемный пятивершинник M4.

В структурах исследованных родонитов достоверность распределения катионов подтверждается низкими значениями  $R$ -факторов 4.02% и 3.09% соответственно, а их кристаллохимические формулы можно представить в следующем виде:



И вот снова победа! Высокожелезистый родонит (образец I) 1 июля 2016 г. утвержден КНМНК

Таблица 2

Состав катионных позиций в изученных минералах со структурным типом родонита

Минерал	Катионные позиции					Источник
	M1	M2	M3	M4	M5	
Родонит	Mn	Mn	Mn	Mn, Mg, Fe	Ca, Mn	[10]
Mg-родонит	Mn <sub>0.89</sub> Mg <sub>0.11</sub>	Mn <sub>0.86</sub> Mg <sub>0.14</sub>	Mn <sub>0.86</sub> Mg <sub>0.14</sub>	Mn <sub>0.53</sub> Mg <sub>0.47</sub>	Ca <sub>0.60</sub> Mn <sub>0.40</sub>	[9]
Родонит	Mn, Mg	Mn, Mg	Mn, Mg	Mn, Fe, Mg	Mn, Ca	[11]
Родонит	Mn, Fe	Mn, Fe	Mn, Ca	Mn, Mg, Fe, Zn	Mn, Ca	[12]
Zn-родонит	Mn, Fe, Ca	Mn, Ca, Fe	Mn, Ca, Fe	Mn, Zn, Fe, Mg	Ca, Mn, Fe	[12]
Ca,Mg,Fe-родонит	Mn, Mg, Fe	Mn, Mg, Fe	Mn, Mg, Fe	Mn, Mg, Fe	Ca, Mn, Fe	[13]
Ферродонит	Mn, Fe	Mn, Fe	Mn, Fe	Fe <sub>0.81</sub> Mn <sub>0.12</sub> Mg <sub>0.04</sub> Zn <sub>0.03</sub>	Ca <sub>0.81</sub> Mn <sub>0.19</sub>	[14]

(№2016-016) как самостоятельный минеральный вид с собственным названием — **ферродонит** (рис.4). Новый минерал отличается от структурно исследованных ранее родонитов и их разновидностей (Mg-, Zn- и (Ca,Mg,Fe)-родонита) собственной позицией железа (табл.2), так что систематика минералов этого семейства, по-видимому, нуждается в пересмотре.

## Пироксмангит и пироксферроит

Минералы группы пироксмангита — силикаты с семичленными цепочками кремнекислородных тетраэдров. В природе пироксмангит  $Mn_2[Si_7O_{21}]$  встречается в виде мелкозернистых агрегатов или хорошо ограненных кристаллов таблитчатой,



призматической и столбчатой формы. Его цвет может меняться от янтарно-желтого до желто-бурого, встречаются также красно-бурые, розовые, гвоздично-розовые разновидности. Пироксмангит характерен для метаморфических пород и метаморфизованных марганцевых руд.

Пироксферроит  $\text{Fe}_7[\text{Si}_7\text{O}_{21}]$  более редок и, как мы уже говорили, впервые был обнаружен на Луне (рис.5). Простота формул обоих минералов обманчива. Сложность их химического состава состоит в широких вариациях содержания как главных элементов, так и примесных.

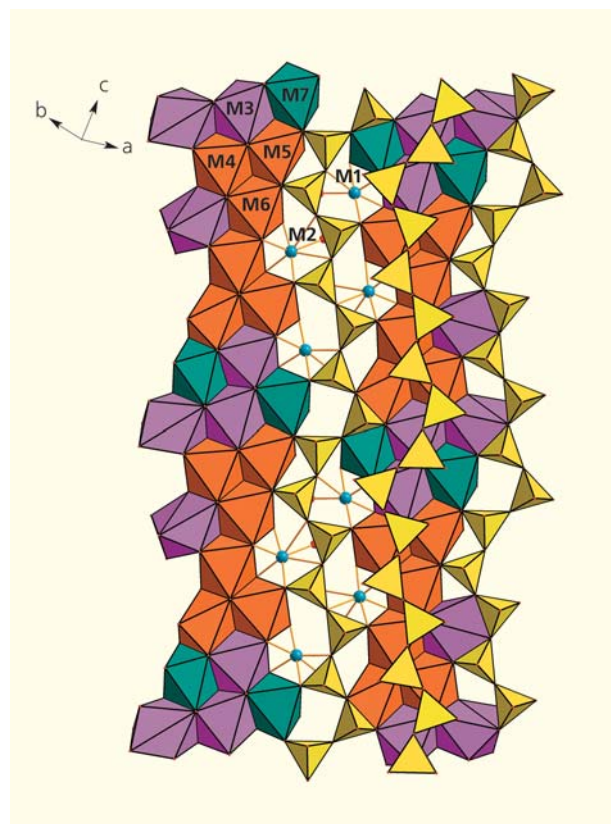


Рис.5 Структура пироксферроита (вверху) и кристалл пироксферроита из лунных пород.

[www.catalogmineralov.ru](http://www.catalogmineralov.ru)

Мы изучили представительную коллекцию этих минералов из различных метаморфических массивов Австралии, Австрии, Германии, России (Южный Урал, Приморье), США, Таджикистана, Чехии и Японии. По данным электронно-зондового микроанализа, наименьшее количество атомов Ca в изученных образцах составляет 0.07 атома на формулу, наибольшее — 2.13. Количество атомов Mn на формулу варьирует от 1.11 до 6.62, Fe — от 0.02 до 3.15, Mg — от 0.00 до 2.12.

Для исследования методами рентгеноструктурного анализа и инфракрасной спектроскопии из ксенолитов щелочных базальтов палеовулкана Беллерберг (массив Айфель) мы отобрали два образца с необычным составом: (Ca, Mn)-содержащий пироксферроит и высокожелезистый Mg-содержащий пироксмангит. Их химический состав отличался значительными вариациями содержания *M*-катионов на формулу: Na — 0.00–0.21, Ca — 0.05–1.20, Mg — 0.45–2.12, Mn — 1.22–4.19, Fe — 2.19–4.20, Al — 0.00–0.08, Cr — 0.00–0.06. Такие особенности состава, нехарактерные для пироксмангита и пироксферроита из объектов других геолого-геохимических типов, видимо, обусловлены тем, что в Беллерберге данные минералы кристаллизовались в явно неравновесных условиях быстро остывающей субвулканической системы, и притом на геохимическом барьере — в узкой зоне контакта химически контрастных пород: щелочных базальтов и глиноземистых гнейсов. Усредненные составы образцов укладываются в формулы для пироксферроита ( $\text{Fe}_{4.20}\text{Mn}_{1.22}\text{Ca}_{0.74}\text{Mg}_{0.58}\text{Na}_{0.21}\text{Al}_{0.06}\text{Cr}_{0.06}\text{Si}_{6.98}\text{O}_{21}$ ) и пироксмангита ( $\text{Mn}_{2.94}\text{Fe}_{2.52}\text{Mg}_{1.32}\text{Al}_{0.08}\text{Ca}_{0.05}\text{Si}_{7.03}\text{O}_{21}$ ).

Структурных расшифровок минералов ряда пироксмангит—пироксферроит значительно меньше по сравнению с бустамитом и родонитом. Это и понятно: подобные минералы редки, а их монокристаллы, как правило, малоприспособны для рентгеноструктурного анализа. Кроме того, исследователям приходится сталкиваться с трудностями, которые возникают при большем числе способов упорядочения катионов в позициях ленты, состоящей из семи разнородных *M*-полиэдров — октаэдров, семивершинников и пятивершинников (см. рис.1). Цепочки из кремнекислородных тетраэдров соединяются с ними вершинами и ребрами. Искаженные полиэдры (семивершинники и пятивершинники) в обоих минералах, как и в структурах изученных образцов родонита, располагаются по краям катионной ленты.

Измеренные параметры триклинных ячеек почти не отличались для обоих минералов:  $a = 6.662$  и  $6.661$ ,  $b = 7.525$  и  $7.513$ ,  $c = 15.895$  и  $15.877$  Å,  $\alpha = 91.55$  и  $91.87$ ,  $\beta = 96.26$  и  $96.37$ ,  $\gamma = 94.50$  и  $94.72^\circ$  для пироксферроита и пироксмангита соответственно. Структуры уточнены до низких значений *R*-факторов 4.22% и 3.94%.

Отличительная особенность нашего пироксферроита — повышенное содержание примесей

Ca и Na, которые наряду с марганцем входят в крупные *M1*- и *M2*-семивершинники со средними расстояниями *M1*–O и *M2*–O 2.352 и 2.372 Å соответственно. Октаэдры *M3*–6 (средние расстояния в них 2.162–2.193 Å) заселены преимущественно атомами Fe с примесью Mn. У нас не было сомнения, что в *M7*-позиции (центрирующей наименьший по объему пятивершинник) Mg преобладает над Fe и Mn (0.6 атома на независимую часть ячейки). Сравнение изученного пироксферроита ( $\text{Fe}_{0.60}\text{Mn}_{0.17}\text{Ca}_{0.10}\text{Mg}_{0.08}\text{Na}_{0.03}\text{Al}_{0.01}\text{Cr}_{0.01}[\text{SiO}_3]$  с лунным ( $\text{Fe}_{0.83}\text{Ca}_{0.13}\text{Mg}_{0.02}\text{Mn}_{0.02}[\text{SiO}_3]$ ) показало, насколько состав земного минерала сложнее и многообразнее (табл.3).

Даже если учесть, что в породах, доставленных «Аполлоном-11», пироксферроит представлен несколькими разновидностями — кальциевой (4.4–6.0 мас.% CaO), магнезильной (до 3.8 мас.% MgO) и железистой, — замещение железа на магний в них ограничено: от ( $\text{Fe}_{0.84}\text{Ca}_{0.13}\text{Mg}_{0.03}\text{SiO}_3$  до ( $\text{Fe}_{0.75}\text{Ca}_{0.12}\text{Mg}_{0.13}\text{SiO}_3$ ) [15].

В пироксмангите позиции *M4*, *M5* и *M6* в октаэдрах с близкими средними расстояниями *M*–O = 2.191, 2.183 и 2.182 Å заняты атомами (Fe, Mn) и Mg с преобладанием атомов Fe. Заселенность самого маленького полиэдра — *M7*-пятивершинника (среднее *M*–O = 2.111 Å) — такая же, как и в пироксферроите: Mg преобладает над Fe и Mn. Что касается более крупных полиэдров *M1*–*M3* и самого крупного из них *M2*-семивершинника с наибольшим средним расстоянием *M*–O = 2.371 Å, то в них разместились Mn с Fe.

Таким образом, анализ распределения катионов в этих минералах указывает на широкий изоморфизм  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и Mg во всех (*M1*–*M7*) позициях. При этом отмечается предпочтительное вхождение Ca и Na в крупные *M1*- и *M2*-семивершинники, а Mg — в самый маленький *M7*-пятивершинник (см. табл.3). Отметим, что в лунном пироксферроите железа гораздо больше: в *M1*–*M5*-позициях Fe преобладает над Ca, а позиции *M6*–*M7* целиком заселены атомами железа.

## Вместо заключения

Исследование представительной коллекции образцов бустамита, родонита, пироксмангита и пироксферроита из горных пород разных генетических типов показало, насколько широко может варьировать состав этих минералов не только в разных группах, но и даже внутри одной. Такие вариации в первую очередь обусловлены разными структурами минералов, что определяет не только состав главных катионов, но и характер изоморфных примесей в полиэдрах катионов-«хозяев». На примере пироксеноидов и пироксенов связь состав—структура прослеживается в полной мере. Решение кристаллических структур четырех образцов бустамита, двух образцов родонита, пироксмангита и пироксферроита, отличающихся по составу от ранее изученных, привело к открытию двух новых минеральных видов — мендигита и феррородонита. Вариации химического состава и структурные особенности новых членов минерального мира важны для понимания кристаллохимии пироксеноидов в целом. Именно кристаллохимический фактор (определяющую роль структурного типа в формировании состава катионов) можно считать решающим для минералов этого семейства при их совместной кристаллизации в одних и тех же термодинамических обстановках. Установление связей между соотношениями *M*-катионов и характером их распределения по позициям с физико-химическими условиями формирования пироксеноидов — интереснейшая задача для будущих исследований.

Сравнение земных минералов с лунными показывает, что, несмотря на большое сходство, лунные образцы отличаются от земных. Внеземные минералы химически более просты, так как из-за отсутствия воды и атмосферы они не подвергались окислению, выветриванию и гидратации. По разнообразию минералов Луна также уступает Земле. Можно считать справедливым утверждение Дж.Фрондел, что «с минералогической точки зре-

**Таблица 3**

**Состав катионных позиций в структурно изученных представителях группы пироксмангита**

Минерал	Катионные позиции							Источник
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>	<i>M7</i>	
Пироксмангит	Mn	Mn	$\text{Mn}_{0.97}$ $\text{Mg}_{0.03}$	$\text{Mn}_{0.95}$ $\text{Mg}_{0.05}$	$\text{Mn}_{0.97}$ $\text{Mg}_{0.03}$	$\text{Mn}_{0.96}$ $\text{Mg}_{0.04}$	$\text{Mn}_{0.92}$ $\text{Mg}_{0.08}$	[16]
Пироксмангит	$\text{Mn}_{0.91}\text{Mg}_{0.09}$	$\text{Mn}_{0.88}$ $\text{Mg}_{0.12}$	$\text{Mn}_{0.89}$ $\text{Mg}_{0.11}$	$\text{Mn}_{0.81}$ $\text{Mg}_{0.19}$	$\text{Mn}_{0.97}$ $\text{Mg}_{0.03}$	$\text{Mn}_{0.83}$ $\text{Mg}_{0.17}$	$\text{Mn}_{0.81}$ $\text{Mg}_{0.19}$	[17]
Пироксмангит	Mn, Fe	Mn, Fe	Mn, Fe	(Fe, Mn) <sub>0.7</sub> $\text{Mg}_{0.3}$	(Fe, Mn) <sub>0.7</sub> $\text{Mg}_{0.3}$	(Fe, Mn) <sub>0.7</sub> $\text{Mg}_{0.3}$	$\text{Mg}_{0.5}$ (Fe, Mn) <sub>0.5</sub>	[18]
Лунный пироксферроит	$\text{Fe}_{0.50}\text{Ca}_{0.35}$	$\text{Fe}_{0.72}$ $\text{Ca}_{0.28}$	$\text{Fe}_{0.81}$ $\text{Ca}_{0.19}$	$\text{Fe}_{0.92}$ $\text{Ca}_{0.08}$	$\text{Fe}_{0.95}$ $\text{Ca}_{0.04}$	Fe	Fe	[19]
Пироксферроит	$\text{Mn}_{0.5}$ $\text{Ca}_{0.4}$ $\text{Na}_{0.1}$	$\text{Mn}_{0.5}$ $\text{Ca}_{0.4}$ $\text{Na}_{0.1}$	Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn	$\text{Mg}_{0.6}$ (Fe, Mn) <sub>0.4</sub>	[18]

ния Луна — убогое место» [15]. На ней практически нет амфиболов, слюд, серпентинов и глин, а также алмазов, рубинов, сапфиров, золота и серебра, галоидов и карбонатов. Вместе с тем на Луне широко распространены пироксены и пироксеноиды.

По составу они главным образом магнезиальные. Лунный пироксферроит в оригинальных образцах находится в ассоциации с троилитом FeS,

который редко встречается на Земле, но часто — на нашем спутнике и в метеоритах [15]

Из 400 кг лунных образцов, хранящихся в Джонсоновском центре космических полетов в Хьюстоне, изучена лишь часть материала. Новые исследования лунных минералов и их сравнение с земными могут быть полезны для познания геологических процессов, происходивших и происходящих как на Земле, так и на ее спутнике. ■

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-35-60101-мол-а-дк).**

## Литература

1. Rasmussen B., Fletcher I.R., Gregory C.J. et al. Tranquillityite: the last lunar mineral comes down to Earth // *Geology*. 2012. V.40. №1. P.83–86.
2. Либай Ф. Структурная химия силикатов. М., 1988.
3. Angel R.J. Structural variation in wollastonite and bustamite // *Miner. Mag.* 1985. V.49. P.37–48.
4. Peacor D.R., Buerger M.J. Determination and refinement of the crystal structure of bustamite,  $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$  // *Z. Krist.* 1962. Bd.117. S.331–343.
5. Obasbi Y., Finger L.W. The role of octahedral cations in pyroxenoid crystal chemistry. I. Bustamite, wollastonite, and pectolite-schizolite-serandite series // *Amer. Mineral.* 1978. V.63. P.274–288.
6. Rapoport P.A., Burnham C.W. Ferrobustamite: the crystal structures of two Ca, Fe bustamite-type pyroxenoids: correction // *Z. Kristallogr.* 1973. Bd.138. S.419–438.
7. Чуканов Н.В., Аксенов С.М., Расцветаева Р.К. и др. Мендигит  $\text{Mn}_2\text{Mn}_3\text{MnCa}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$  — новый минеральный вид из вулканического района Айфель, Германия // *ЗРМО*. 2015. Т.144. №2. С.48–60.
8. Аксенов С.М., Щипалкина Н.В., Расцветаева Р.К. и др. Высокожелезистый бустамит из Брокен Хилла, Австралия: кристаллическая структура и особенности катионного упорядочения // *Кристаллография*. 2015. №3. Т.60. С.385–390.
9. Peacor D.R., Essene E.J., Brown P.E., Winter G.A. The crystal chemistry and petrogenesis of a magnesian rhodonite // *Amer. Mineral.* 1978. V.63. P.1137–1142.
10. Peacor D.R., Niizeki N. The redetermination and refinement of the crystal structure of rhodonite.  $(\text{Mn}, \text{Ca})\text{SiO}_3$  // *Z. Kristallogr.* 1963. Bd.119:98. S.98–116.
11. Obasbi Y., Finger L.W. Pyroxenoids: a comparison of refined structures of rhodonite and pyroxmangite // *Carnegie Institution of Washington Year Book*. 1975. V.74. P.564–569.
12. Nelson W.R., Griffen D.T. Crystal chemistry of Zn-rich rhodonite («fowlerite») // *Amer. Mineral.* 2005. V.90. P.969–983.
13. Leverett P., Williams P.A., Hibbs D.E. Ca-Mg-Fe-rich rhodonite from the Morro da Mina mine. Conselheiro Lafaiete. Minas Gerais. Brasil // *The Mineral Rec.* 2008. V.44. P.149–184.
14. Shchepalkina N.V., Chukanov N.V., Pekov I.V. et al. Ferrorhodonite,  $\text{CaMn}_3\text{Fe}[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$ , a new mineral species from Broken Hill, New South Wales, Australia // *Phys. Chem. Minerals*. 2017. In press.
15. Фрондел Дж. Минералогия Луны. М., 1978.
16. Pinckey L.R., Burnham C.W. Effects of compositional variation on the crystal structures of pyroxmangite and rhodonite // *Amer. Mineral.* 1988. V.73. P.798–808.
17. Obasbi Y., Finger L.W. Pyroxenoids: a comparison of refined structures of rhodonite and pyroxmangite // *Carnegie Institution of Washington Year Book*. 1975. V.74. P.564–569.
18. Щипалкина Н.В., Аксенов С.М., Чуканов Н.В. и др. Пироксеноиды ряда пироксмангит—пироксферроит из ксенолитов палеовулкана Беллерберг (Айфель, Германия): вариации химического состава и особенности распределения катионов // *Кристаллография*. 2016. Т.61. №6. С. 896–904.
19. Burnham C.W. The crystal structure of pyroxferroite from Mare Tranquillitatis // *Proceedings of the Second Lunar Science Conference*. 1971. V.1. P.47–57.



# Развитие редкой болезни: ДНК-полимераза как регулятор иммунитета

П.Л.Старокадомский,  
кандидат биологических наук  
Юго-Западный медицинский центр Техасского университета  
Даллас, США

Есть одно очень редкое наследственное заболевание — XLPDR (X-linked reticulate pigmentary disorder). В русском языке у него даже нет названия (буквальный перевод — «ретикулярное пигментное расстройство, сцепленное с X-хромосомой»). Впервые оно было описано в 1981 году и сегодня диагностировано лишь у 18 человек во всем мире. Девочки-носители в целом здоровы и, кроме слабых пятен на коже, никаких расстройств не имеют, так как гетерозиготны и здоровая X-хромосома компенсирует скрытую мутацию во втором аллеле. Однако у мальчиков X-хромосома всего одна и мутация не скомпенсирована, так что у них еще в раннем детстве развивается генерализованная гиперпигментация кожи и волосы на голове начинают расти крайне необычным образом — как будто специально зачесаны назад (рис.1). Среди других проявлений болезни — респираторные инфекции, дискератоз роговицы глаз (сопровождается светобоязнью), гипогидроз (нарушает теплообмен), задержки роста в раннем возрасте, воспаления желудочно-кишечного тракта и почек, синдактилия (сращение пальцев кисти или стопы). Лекарства от этого заболевания не существует, поскольку до недавнего времени даже причина болезни оставалась загадкой. Состояние больных лишь облегчают капли



Рис.1. Проявления заболевания XLPDR [1].

**Ключевые слова:** полимераза, *POLAI*, XLPDR, интронная мутация, иммунитет.  
**Key words:** polymerase, *POLAI*, XLPDR, intronic mutation, immunity.

© Старокадомский П.Л., 2017

для глаз, крема, антибиотики при инфекциях и контроль температуры тела.

Когда мы начали свое исследование, о природе и механизмах этой редкой болезни ничего известно не было. Нам удалось обнаружить мутацию, вызывающую это заболевание, и разобраться в его молекулярной основе [2]. Кроме того, мы открыли новый тип биологических молекул, которые регулируют внутриклеточный иммунитет.

Исходно генетики секвенировали экзон (все белок-кодирующие гены) пациентов, но мутацию, ответственную за развитие заболевания, не нашли. Поэтому они попросили нас изучить молекулярный механизм синдрома XLPDR, взглянуть на проблему с точки зрения молекулярной иммунологии. К тому времени мы уже опубликовали результаты похожего исследования, где описали молекулярные изменения во внутриклеточных сигнальных путях у больных другим редким синдромом — XLID (X-linked intellectual disability), наследственным слабоумием, которое тоже часто сцеплено с X-хромосомой и проявляется только у мальчиков [3]. Сначала мы исследовали фибробласты кожи и клетки крови больных XLPDR. Во всех клеточных линиях, полученных от пациентов, существенно сильнее экспрессировались гены, кодирующие иммунологические маркеры, в частности гены, активируемые транскрипционным фактором NF-κB и интерферонами. По-видимому, у больных неправильно работал какой-то важный регуляторный ген, потому что клетки ведут себя так при вирусных инфекциях, а мы проводили тесты в абсолютно стерильных условиях.

Тем временем генетики выяснили, в каком гене мутация. Они провели полное секвенирование геномов пациентов, и оказалось, что у всех есть одинаковая точечная замена в тринадцатом интроне гена *POLA1*, который кодирует каталитическую субъединицу ДНК-полимеразы α. Этот фермент участвует в репликации генома: инициирует репликацию лидирующей цепи ДНК и синтезирует затравки фрагментов Оказаки отстающей цепи. Найденная мутация в интроне гена *POLA1* вызывает нарушения сплайсинга пре-мРНК и сдвиг рамки считывания (рис.2). Во время трансляции рибосомы налетают на внезапный стоп-кодон — трансляция останавливается, а весь комплекс деградирует. В итоге клетки пациентов содержат очень мало правильной мРНК (лишь 20–40% от нормы) и крайне мало самой ДНК-полимеразы α, хотя, казалось бы, нехватка полимеразы должна быть смертельной (действительно, позже выяснилось, что люди выживают только с этой мутацией, — вероятно, другие мутации летальны на стадии раннего развития).

Мы стали думать, как именно дефицит ДНК-полимеразы α приводит к развитию синдрома XLPDR. Предположив, что лимфоциты оказываются не в силах быстро размножиться и подавить инфекцию, мы исследовали образцы крови пациентов. Однако мутация не влияла на количество иммунных клеток в крови, а значит, делятся они нормально. Стало быть, нарушается метаболизм клеток, что каким-то образом провоцирует иммунный ответ. Действительно, мы обнаружили, что дефицит этой полимеразы почему-то приводит к хронической

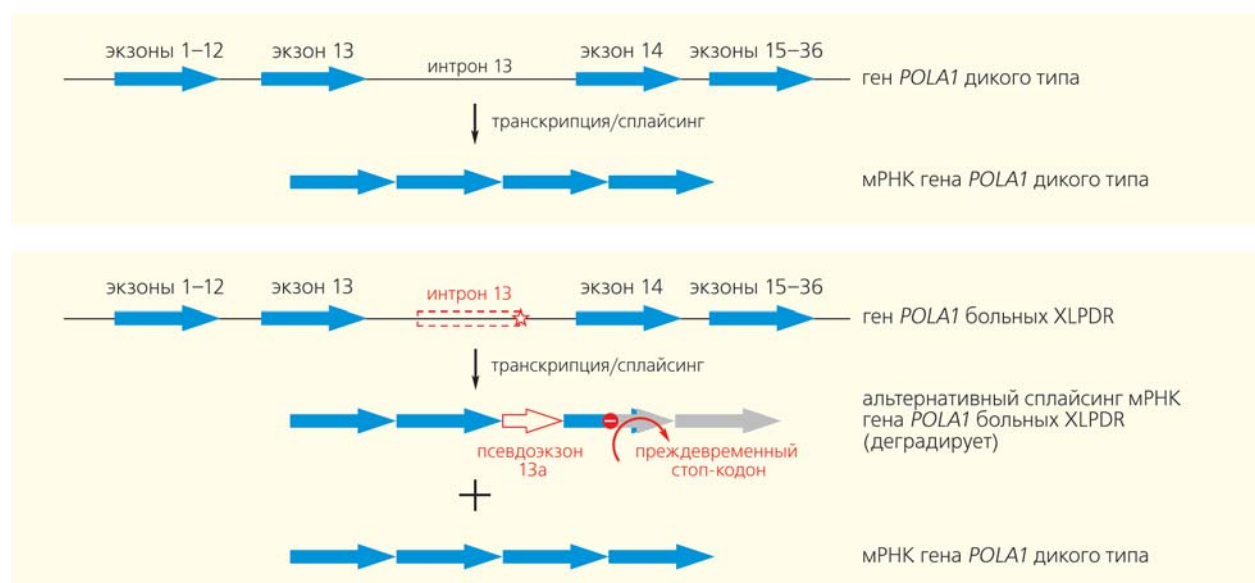


Рис.2. Схема гена *POLA1* и мРНК у здоровых людей (сверху) и у больных XLPDR. Из-за точечной замены в интроне 13 (показана звездочкой) появляется ложный альтернативный сайт сплайсинга. В результате из большей части молекул пре-мРНК образуется нежизнеспособная мРНК, которая быстро деградирует. Меньшая часть молекул мРНК все же собирается правильно, что и обеспечивает выживание клеток (репликацию), однако этого количества недостаточно, чтобы выполнять альтернативные функции (пояснения в тексте).

активации многих сигнальных путей в клетках. Более того, если с помощью специфической кРНК (короткой интерферирующей РНК) снизить количество мРНК гена *POLAI* в нормальных клетках, в них тоже запускается воспалительный ответ. Получалось, что ДНК-полимераза  $\alpha$  как-то подавляет воспалительный ответ клеток, то есть служит негативным регулятором иммунитета. Оставалось выяснить, как же она это делает.

С помощью микроскопии мы обнаружили, что значительное количество этого белка находится в цитоплазме (что для ДНК-зависимой ДНК-полимеразы довольно необычно), и стали искать его связь с другими известными цитоплазматическими регуляторами иммунного ответа. В клетках ведь есть много сигнальных путей и иммунных сенсоров, причем большинство этих белков при активации взаимодействуют друг с другом напрямую. Мы даже специально разработали метод, который упрощает поиск подобных взаимодействий [4]. Однако ДНК-полимераза  $\alpha$  напрямую не была связана ни с одним известным сигнальным путем. Чтобы определить, какой же именно сигнальный путь регулируется этой полимеразой, мы снижали ее концентрацию (с помощью кРНК) в культурах различных нормальных клеток до уровня, наблюдающегося у больных, и проверяли, насколько клетки становились чувствительны к тому или иному иммунному стимулу. Так как на поверхности клеток человека присутствует несколько десятков различных рецепторов, распознающих чужеродные агенты, мы последовательно добавляли к клеткам многочисленные лиганды для Toll-подобных рецепторов, стимулировали клетки интерлейкином-1 и фактором некроза опухоли (универсальными провоспалительными цитокинами, из-за которых у человека повышается температура и наступает болезненная усталость), а также имитировали вирусное заражение (что активирует внутриклеточные ДНК- и РНК-сенсоры, например RIG-I, MAVS, STING). Если ДНК-полимераза  $\alpha$  связана с определенным сигнальным путем, то клетка с искусственным нокдауном гена *POLAI* должна становиться гиперчувствительной тоже только к определенному лиганду. Однако при нокдауне гена *POLAI* большинство клеток приобретало гиперчувствительность ко всем стимулам сразу, как будто ДНК-полимераза  $\alpha$  служила глобальным регулятором иммунитета.

В описанных выше экспериментах с кРНК мы заметили, что нокдаун гена *POLAI* в одной из самых популярных лабораторных линий клеток — НЕК293, карциномы почки, — не запускал ожидаемого воспалительного ответа. А ведь клетки НЕК293 — одна из самых популярных лабораторных клеточных линий потому, что в них легко ввести любую ДНК. Из-за ряда мутаций в них практически полностью отсутствуют внутренние антивирусные сенсоры, которые должны узнавать вирусные молекулы РНК и ДНК, проникшие в клетку. Раз

именно эта клеточная линия оказалась невосприимчивой к перепадам количества ДНК-полимеразы  $\alpha$ , значит, наблюдаемый эффект каким-то образом должен быть связан с концентрацией нуклеиновых кислот в цитоплазме и способностью клетки различать эти нуклеиновые кислоты по принципу «свой — чужой».

Известно, что клетки очень тщательно контролируют концентрацию нуклеиновых кислот в цитоплазме. При инфекции вирусы впрыскивают свою ДНК (или РНК) внутрь клеток, и клеточные сенсоры распознают чужеродные нуклеиновые кислоты по целому ряду особенностей. При обнаружении чужеродной ДНК или РНК активируется интерфероновая защита, основа антивирусного ответа, — замедляется метаболизм (чтобы вирусные частицы не успевали собраться), секретируются интерфероны (чтобы оповестить о заражении соседние клетки и иммунную систему в целом) и внутри клеток деградируется все подозрительное. А ведь то, что мы наблюдали в клеточных линиях больных XLPDR, сильно напоминало именно антивирусный ответ, только вот клетки находились в стерильных условиях и вирусами не инфицировались.

Итак, мы знали следующее:

- ДНК-полимераза  $\alpha$  синтезирует ДНК (фрагменты Оказаки);
- ДНК-полимераза  $\alpha$  в больших количествах находится в цитоплазме клеток;
- при дефиците ДНК-полимеразы  $\alpha$  клетки ведут себя так, словно заражены вирусом.

Клетки, не чувствительные к дефициту ДНК-полимеразы  $\alpha$  (линия НЕК293), не имеют активных систем регистрации вирусных РНК и ДНК, а также РНК:ДНК-комплексов (которые образуются при обратной транскрипции у многих вирусов).

Значит, ДНК-полимераза  $\alpha$ , по-видимому, как-то уменьшает количество вирусной или собственной (например, ретротранспозонной) РНК или ДНК в цитоплазме. А когда ее по той или иной причине нет, мусорные нуклеиновые кислоты накапливаются в цитоплазме и непрерывно активируют антивирусные сигнальные пути. Это и вызывает постоянное воспаление, наблюдающееся у больных.

Однако нам хотелось понять детальный механизм работы ДНК-полимеразы  $\alpha$ . Ведь она одна из немногих полимераз с неактивным экзонуклеазным доменом, а потому не способна напрямую уничтожить мусорную ДНК, как, например, фермент TREX1 [5]. У нас был полный набор антител к нуклеиновым кислотам: к двух- и одноцепочечной ДНК, а также к РНК:ДНК-комплексам. Мы отделили цитоплазматическую фракцию клеток от ядерной, добавляли в нее сефарозные шарики, на которых предварительно иммобилизовали соответствующие антитела с флуоресцентной меткой, затем отмывали шарики (чтобы удалить все несвязавшиеся молекулы) и оценивали яркость их свечения под микроскопом. Если в цитоплазме



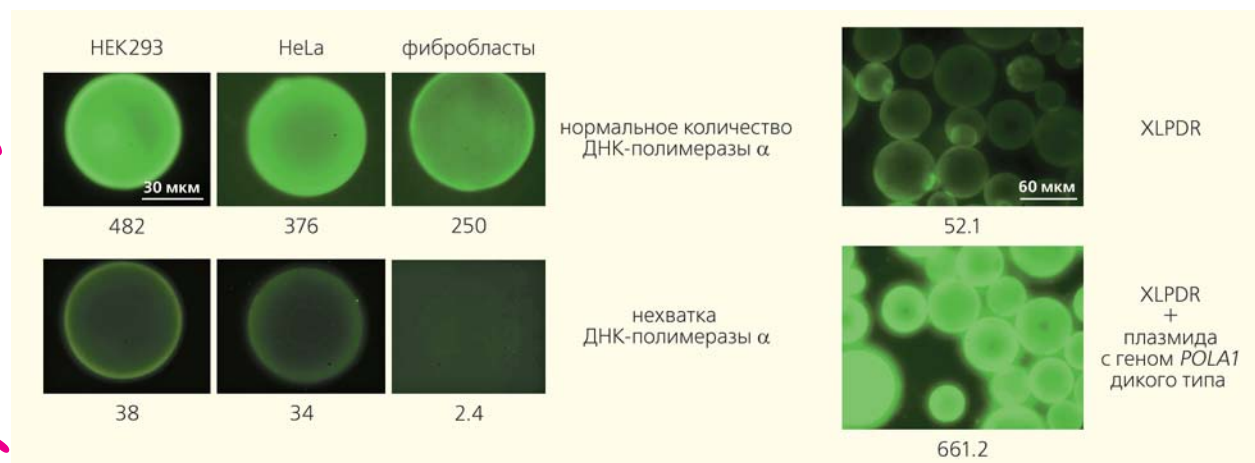


Рис.3. РНК:ДНК-комплексы в цитоплазме различных клеток здоровых людей и пациентов с синдромом XLPDR (линии HEK293, линии HeLa с нокаутом гена *POLA1*, фибробластов), а также в цитоплазме клеток пациентов с синдромом XLPDR до и после добавления в геном здоровой копии гена *POLA1* [2]. Числа обозначают относительную флуоресценцию. Свечение различается более чем в 10 раз.

много молекул ДНК или РНК:ДНК-комплексов, то шарики должны светиться ярко, в противном же случае — тускло. Начав сравнивать свечение цитоплазмы в здоровых клетках и в клетках пациентов с синдромом XLRPD, мы сразу обнаружили поразительное различие: в цитоплазме здоровых клеток оказалось чрезвычайно много РНК:ДНК-молекул, тогда как в цитоплазме клеток пациентов их почти не было (рис.3). Результат, совершенно противоположный ожидавшемуся. Однако мы поняли почему. Фрагмент Оказаки — классический продукт ДНК-полимеразы  $\alpha$  — представляет собой небольшую РНК-затравку. Полимераза добавляет к ней ДНК-нуклеотиды — и образуется РНК:ДНК-комплекс, с которого начинается репликация. А значит, в свободное от репликации время цитоплазматическая фракция полимеразы синтезирует подобные РНК:ДНК-комплексы в цитоплазме. Мы очистили эти цитоплазматические молекулы-химеры и вводили в клетки больных синдромом XLPDR. Действительно, воспаление на время пропадало. Следовательно, ДНК-полимераза  $\alpha$  постоянно синтезирует иммунологически инертные РНК:ДНК-комплексы (размером около 100–200 пар

нуклеотидов), которые, вероятно, служат неким «белым шумом», то есть не дают цитоплазматическим сенсорам чересчур активно реагировать на незначительные «утечки» нуклеиновых кислот, например, из ядра или при единичных повреждениях митохондрий. И лишь когда концентрация подозрительной ДНК превышает уровень шума, запускается антивирусная система. Итак, задача ДНК-полимеразы  $\alpha$  — постоянно производить «нуклеиновый шум», чтобы не допустить ложного запуска интерфероновой реакции.

Безусловно, наша идея о том, что РНК:ДНК-комплексы играют роль «нуклеинового шума», — пока только рабочая гипотеза. Мы до сих пор не сумели определить последовательность нуклеотидов в этих гибридных молекулах, поэтому не представляем их мишеней внутри клеток. Однако один из результатов нашей работы уже имеет прикладное значение, причем немаловажное: теперь можно генотипировать сестер больных ребяток, чтобы выявить среди них носителей мутации. А главное, зная точно, в каком гене неполадки, можно попытаться разработать лекарство от этой загадочной редкой болезни — XLPDR. ■

## Литература

1. Pezzani L., Brena M., Callea M. et al. X-linked reticulate pigmentary disorder with systemic manifestations: a new family and review of the literature // *Am. J. Med. Genet. A.* 2013. V.161A. P.1414–1420. Doi:10.1002/ajmg.a.35882.
2. Starokadomskyy P., Gemelli T., Rios J. et al. DNA polymerase- $\alpha$  regulates type I interferon activation through cytosolic RNA:DNA synthesis // *Nat. Immunol.* 2016. V.17. P.495–504. Doi:10.1038/ni.3409.
3. Starokadomskyy P., Gluck N., Li H. et al. CCDC22 deficiency in humans blunts activation of pro-inflammatory NF- $\kappa$ B signaling // *J. Clin. Invest.* 2013. V.123. P.2244–2256. Doi:10.1172/JCI66466.
4. Starokadomskyy P., Burstein E. Bimolecular affinity purification — a variation of TAP with multiple applications // *Methods Mol. Biol.* 2014. V.1177. P.193–209. Doi:10.1007/978-1-4939-1034-2\_15.
5. Stetson D., Ko J., Heidmann T., Medzhitov R. Trex1 prevents cell-intrinsic initiation of autoimmunity // *Cell.* 2008. V.134. P.587–598. Doi:10.1016/j.cell.2008.06.032.

# Гигантская морская ящерица со склона Золотого хребта на Чукотке

В.Р.Алифанов,

кандидат биологических наук

Палеонтологический институт имени А.А.Борисяка РАН

Москва

А.А.Грабовский,

Ботанический институт имени В.Л.Комарова РАН

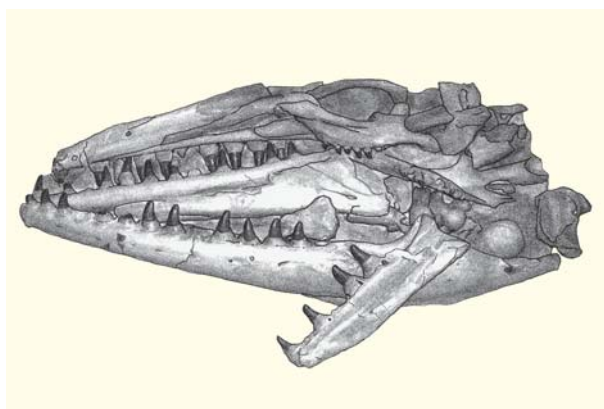
Санкт-Петербург

**М**озазавриды (Mosasauridae) — крупное семейство позднемеловых ящериц, насчитывавшее более двух десятков родов и примерно вдвое больше видов. К настоящему времени раскрыты многие особенности строения, биологии и образа жизни представителей этой ископаемой группы. Теперь известно, что ее появление и распространение связано с умением постоянно жить в море. За движение в воде отвечал длинный хвост, напоминавший (благодаря вертикальной лопасти на конце) хвостовой плавник рыб. Маневренному плаванию способствовали сильно укороченные и преобразованные в ласты конечности. Для морских ящериц характерны обычные для хищников крупные и острые зубы на удлинённых челюстях. Питались они в основном головоногими моллюсками и рыбой, которыми теплые позднемезозойские моря были чрезвычайно богаты.

Мозазавриды обычно достигали нескольких метров в длину. Неоднократно среди них появлялись формы, чья длина превышала 15 м. Это рекордная величина среди всех других водных позвоночных мезозоя, что превращало морских ящериц в грозных хищников. Гигантизм позволял им удерживаться на вершине пищевой пирамиды всех мезозойских морей.

Ископаемые остатки первых мозазаврид были найдены более 200 лет назад. В последнее время для их классификации все чаще используется таксон Mosasauria (мозазавры). Он появился давно и связан с предположением о древнем происхождении и эволюционной обособленности мозазаврид и их ближайших родственников.

Постоянный предмет обсуждения — родственные связи этой древней группы. Не вызывает со-



Череп первого научно описанного мозазавра (*Mosasaurus*), давшего название ископаемому семейству морских ящериц *Mosasauridae* (мозазавриды). Находка была сделана на юге Голландии между 1770 и 1774 гг. Весной 1795 г. она по воле исторических обстоятельств оказалась во Франции (ныне хранится во Французском государственном музее естественных наук в Париже). Прошло немало лет, прежде чем остатки то ли крокодила, то ли кита признали ящерицей.

Здесь и далее рисунки В.Р.Алифанова

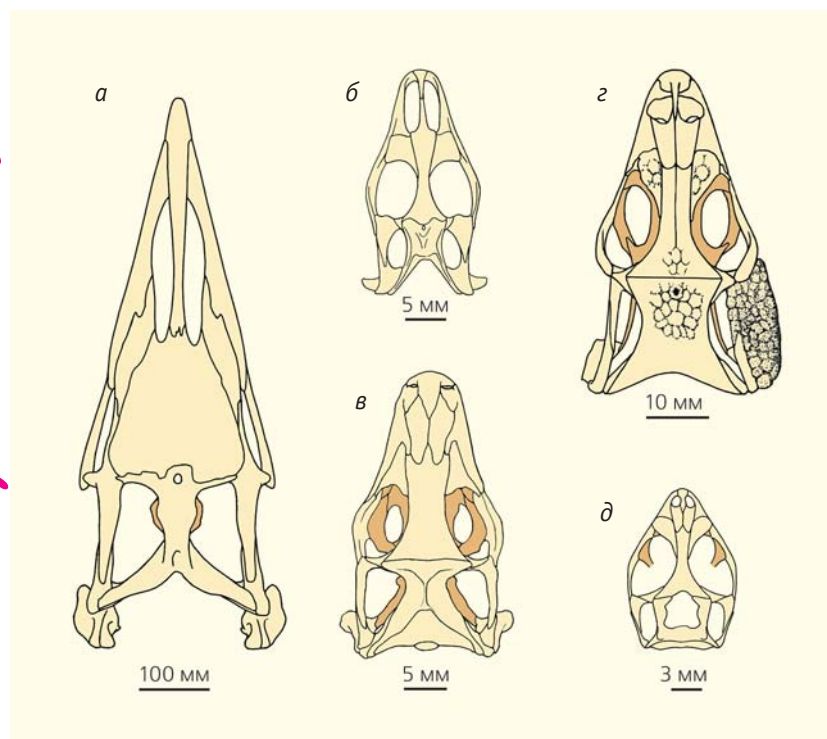
мнений родство мозазаврид с более древними айгиалозавридами (*Aigialosauridae*) и долихозавридами (*Dolichosauridae*), представители которых также отличались водным образом жизни. Миниатюрные и, скорее всего, наземные паравараниды (*Paravaranidae*), обитавшие почти в самом конце мелового периода на территории современной пустыни Гоби, также причисляются к мозазаврообразным ящерицам.

Наибольшее распространение получила гипотеза о филогенетической близости мозазаврид с плагиотрофными (вараноидными) ящерицами. Однако сходство отдельных черт строения у представителей двух групп (например, загнутые назад зубы, удлиненные носовые отверстия, вытянутые челюсти и др.) в данном случае может быть связано с не-

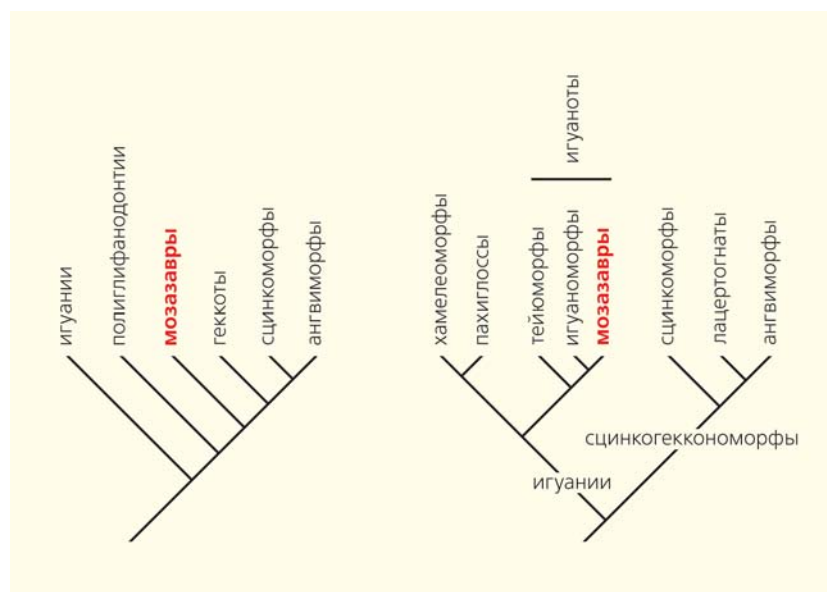
**Ключевые слова:** Mosasauridae, поздний мел, Чукотка, ископаемые остатки.

**Key words:** Mosasauridae, Late Cretaceous, Chukotka, fossil remains.

© Алифанов В.Р., Грабовский А.А., 2017



Череп ящериц (вид сверху): а — мозазаврид танивазавр (*Taniwhasaurus*), б — параваран (*Paravaranus*), мозазаврообразная форма из позднего мела Монголии, в — современный тупинамб (*Tupinambis*) из группы американских варанов (макротейиды), г — гобидерма (*Gobiderma*), позднемеловая платинотная (вараноидная) ящерица из Монголии, д — игуа (*Igua*), архаичная «игуана» из позднего мела Монголии.



Два варианта филогенетических связей ящериц (схемы упрощены). В обоих случаях положение мозазавров не совпадает с традиционной гипотезой их родства с варанами (ангиморфами). На левой схеме ископаемая группа отвечает раньше ряда крупных стволов [5], а на правой входит в состав игуаний, среди которых проявляет близкую родственную связь с игуаноморфами (*Iguanidae sensu lato*) [6].

зависимой параллельной адаптацией к питанию позвоночными животными. В связи с этим в последнее время появилось несколько новых и в чем-то неожиданных точек зрения. Они сходятся в том, что у ископаемых платинот признаки сходства с мозазаврами выражены не всегда. Например, у некоторых архаичных варанообразных ящериц нет удлинённых носовых отверстий, но у них нередко имеются кожные окостенения (остеодермы), которые отсутствуют у типичных мозазавров.

Некоторые из новых представлений, опираясь на общий признаковый анализ с применением новейших компьютерных программ, устанавливают архаичность мозазавров по отношению к большинству ящериц, а другие допускают их близость с современными игуанами (игуаноморфами). В последнем случае были использованы результаты исследования закономерностей эволюции черепа ящериц. Ключевая особенность — тип строения костей нёбного комплекса. Он отличен не только от собственно вараноидных ящериц, но и от макротейид (американских варанов), которые также проявляют признаки сходства с мозазаврами.

Мозазавриды появились в морях Европы в сеноманском веке позднего мела, примерно 98 млн лет назад. За пределы первичного ареала группа вышла 92–90 млн лет назад (во второй половине туронского века). В то время ее представители освоили внутреннее море Северной Америки, прибрежно-морские районы северной части Южной Америки, а также северной и западной частей Африки. Спустя несколько миллионов лет мозазавриды поселились у восточного побережья Азии и у западного побережья Австралии. Еще позднее они достигли юга Африки, а почти 75 млн лет назад (в кампанском веке) уже широко распространились в Южном полушарии [1]. Волны расселения, несомненно,





Схематическая геохронологическая шкала позднего мела.



Местонахождение (отмечено треугольником) на карте.

связаны с периодами потепления морских и океанических вод. Вероятно, одно из потеплений позволило морским ящерицам проникнуть далеко на север, в район современного Чукотского п-ова.

На Чукотке мозазавриды открыты А.А.Грабовским — одним из авторов статьи. Случилось это в 2011 г. в восточной части Нижне-Анадырской низменности, на северо-восточном склоне Золотого хребта, где широко распространены отложения мела. Остатки морской ящерицы обнаружены в одном месте — на правом берегу р.Золотая Вторая (левый приток р.Волчья). В 2012 и 2013 гг. на местонахождении удалось собрать дополнительный материал. Обследования в 2014 г. и поиск новых костеносных обнажений результатов не дали. Таким образом, перспектива дальнейших полевых исследований иссякла.

В местонахождении костеносные отложения располагаются непосредственно под почвенным слоем. Разрез сложен аллювиальными песчаниками и алевроитистыми глинами, переслаивающимися с крупнозернистыми серо-белыми кварцевыми песками. Именно к последним приурочена находка остатков водного ящера. Это се-

рия из 14 позвонков терминальной части хвостового отдела осевой части скелета, обломок челюстной кости, отдельные поврежденные зубы, принадлежавшие, судя по всему, одной особи. Большая часть остатков собрана с поверхности обнажения, меньшая — извлечена из толщи склона.



Правый берег р.Золотой Второй, на котором обнажены слои, содержащие остатки мозазавриды.

Здесь и далее фото А.А.Грабовского



Серия хвостовых позвонков мозазаврида из местонахождения Золотого хребта. Все элементы принадлежат задней половине хвостового отдела. Видно, что сочленовные поверхности тела вогнуты спереди и выпуклы сзади. Такой тип строения позвонков называется процельным и свойствен большинству ископаемых и современных ящериц.

Два позвонка удалось обнаружить на дне реки, где они подверглись разрушению и оказались частично окатаны. К сожалению, сохранность остальных материалов также оставляет желать лучшего. Все позвонки, представленные телами длиной от 50 до 60 мм, несут следы деформации разной степени. Их отростки, за редким исключением, обломаны. Находки хранятся в Музейном центре «Наследие Чукотки» в г.Анадырь.

Интересной оказалась проблема возраста находки. Озадачивает то, что в районе местонахождения на геологической карте указаны только отложения позднего кайнозоя и раннего мела. Находке мозазаврида они никак не соответствуют. На решение задачи натолкнуло открытие в полукилометре от местонахождения (вверх по течению реки) обнажения, в котором вскрыты отложения мощностью 70–100 м, содержащие раковины брахиопод, двустворчатых моллюсков, гастропод и аммонитов, а также многочисленные зубы акул сеноманского возраста. Эти данные позволя-

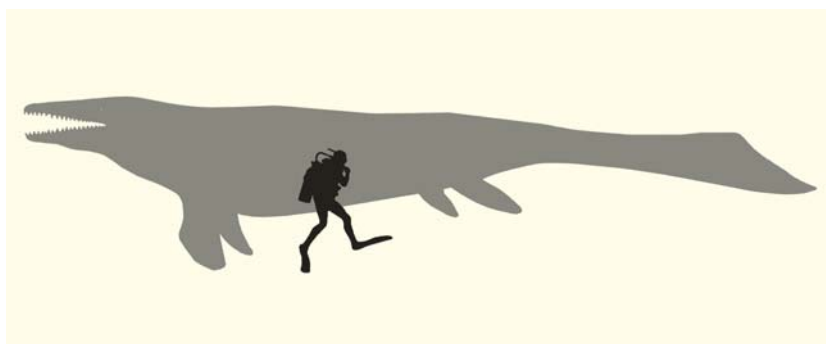


Отдельный хвостовой позвонок (вид сзади). В его верхней части заметны аркообразно сомкнутые невральные отростки (продолжающий их остистый отросток обломан), а снизу — бугорки для прикрепления так называемых гемальных дужек, которые, похоже, к телу позвонка не прирастали.

ют предположить, что вмещающие ископаемую фауну отложения представляют собой гинтеровскую свиту (аптский-туронский века), которая указана в южной части хребта Золотого (в районе Ушканьего кряжа и средней части течения р.Тнек-веем). Однако кости мозазаврида, скорее всего, приурочены к отложениям другой — барыковской свиты, возраст которой определяется интервалом от коньякского до кампанского века [2, 3]. И эта свита в окрестностях местонахождения не отмечена, но представлена там же, где и гинтеровская. Если возраст находки морской ящерицы подтвердится, то вмещающие отложения можно сопоставить с некоторыми формациями (Верхняя Йезо, Кунитан, Тамаяма, возможно, Асизава) из разных районов Японии. В них остатки мозазаврида известны давно.

Сохранность не позволяет точно определить родовую и видовую принадлежность древней морской ящерицы со склонов Золотого хребта. Ее затруднительно отнести и к какому-то опреде-

ленному подсемейству, которых в составе семейства Mosasauridae выделяют четыре: Hallisaurinae, Mosasaurinae, Plioplatecarpinae, Tylosaurinae. Предварительно можно сказать, что находка не может быть отнесена к архаичным халлизавринам или к обладающим специфическими чертами строения позвонков мозазавринам. Перспективным остается поиск родственных связей среди плиоплатекарпин или тилозаврин. Представители именно этих двух групп преобладают среди докампанских находок морских ящериц в районах восточного



Реконструкция (внешний контур) тилозавра (*Tylosaurus*). Мозазавриды — гиганты мира мезозойских позвоночных. У них не существовало конкурентов, поэтому вымирание морских ящериц могло быть связано только с глобальным похолоданием или дефицитом пищи. Что и случилось в самом конце позднего мела.

побережья древней Азии. Здесь они представлены прежде всего материалами из Японии [4].

Из родов, с которыми чукотская форма теоретически может состоять в близком родстве, можно назвать тилозавра (*Tylosaurus*) и танивазавра (*Taniwasaurus*). Тилозавр был широко распространен в позднем мелу. Он представлен в Северной Америке и в Европе, в том числе на юге Швеции. Остатки тилозавра зафиксированы также в отложениях кампанского—маастрихтского ярусов в Японии. В этой же стране обнаружены кости скелета танивазавра, но из более древних (сантонский век) отложений. Примечателен также факт распространения последнего рода в приполярных широтах Южного полушария.

Предпосылкой для появления мозазаврид на территории Нижне-Анадырской низменности стали геологические события, начавшиеся еще в конце юрского периода. Тогда здесь сформировался обширный морской залив. В раннем и позднем мелу воды моря периодически отступали, оставляя многочисленные лагуны и бухты. Именно такие условия, скорее всего, привлекали к себе морских ящеров.

В связи с чукотской находкой возникает вопрос о маршруте, по которому мозазавриды проникли столь далеко на север. Возможны два варианта ответа. Один путь предполагает первоначальное освоение восточных окраин древнего океана Тетиса и далее тихоокеанского побережья Азии. Другой — проходил из внутреннего североамериканского моря через межамериканский пролив и вдоль западного берега Северной Америки и южных бере-



Варианты путей проникновения мозазаврид в северную часть Тихого океана через освоение западного побережья Северной Америки или восточного берега Центральной Азии. Возможно, в периоды потеплений оба указанных маршрута действовали одновременно.

гов Аляски и Чукотки. Обе версии не исключают друг друга. Они также основаны на допущении, что мозазавриды плавали преимущественно вдоль береговой линии мезозойских континентов.

Столь северная находка ископаемых остатков морской ящерицы интересна для палеогеографических и палеоклиматологических реконструкций. Она расширяет представление о распространении мозазаврид на территории нашей страны (ранее их остатки были известны в Крыму, в разных регионах Поволжья, а также в Оренбургской и Пензенской областях). Открытие важно и для реконструкции далекого прошлого Чукотки: с помощью находки морской ящерицы удастся раскрыть неизвестную ранее страницу ископаемой летописи этого региона. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-05-00408).**

## Литература

1. Polcyn M.J., Jacobs L.L., Araújo R. Physical drivers of mosasaur evolution // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2014. V.400. P.17–27.
2. Герман А.Б. Альбская — палеоценовая флора Северной Пацифики. М., 2011 (Тр. ГИН РАН. Вып. 592).
3. Пергамент М.А. Биостратиграфия и иноцерамы сенона (сантон—маастрихт) тихоокеанских районов СССР. М., 1974 (Тр. ГИН АН СССР. Вып.260).
4. Sato T., Konishi T., Hirayama R., Caldwell M.W. A review of the Upper Cretaceous marine reptiles from Japan // *Cretaceous Research*. 2012. V.37. P.319–340.
5. Gauthier J.A., Kearney M., Maisano J.A. et al. Assembling the squamate tree of life: perspectives from the phenotype and the fossil record // *Bull. Peabody Museum Natur. Hist.* 2012. V.53. №1. P.3–308.
6. Алифанов В.Р. Отряд Lacertilia // Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы: Справочник для палеонтологов, биологов и геологов. Ч.2 / Ред. Е.Н.Курочкин, А.В.Лопатин. М., 2012. С.7–136.



# Удивительный карст в долине реки Синеи

Е.В.Трофимова,  
кандидат географических наук  
Институт географии РАН  
Москва







Синские столбы — скальные останцы, образовавшиеся в результате подземного карста.

Здесь и далее фото автора

В широтном течении великой сибирской реки Лены, в 200 км от Якутска, находится удивительный по красоте уголок. Река Синяя, левый приток Лены, образует живописную долину, протягивающуюся почти на 600 км. Интересно, что название реки происходит от эвенкийского *сиэне*, что означает «песок».

В июле 2015 г. участок долины р.Синей протяженностью в 190 км (между устьями притоков Матта и Биллях) был включен в Список всемирного наследия ЮНЕСКО по критерию VIII, как «выдающийся пример основных этапов истории Земли, включая следы древней жизни, серьезные геологические процессы, которые продолжают происходить в развитии форм земной поверхности, существенные геоморфологические или физико-географические особенности рельефа» [1, с.9]. Таким выдающимся примером современного геолого-геоморфологического процесса здесь служит карст в промороженных известняках. Он развивается в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород (мощностью до 300–500 м [2]) в континентальном экстремально холодном климате: средняя годовая температура воздуха, по данным метеостанции Якутск, здесь составляет  $-10.2^{\circ}\text{C}$  при годовой ее амплитуде до  $100^{\circ}\text{C}$ , а сумма осадков не превышает 213 мм.

Долина Синей находится на Приленском плато, его абсолютная высота около 250–350 м. Территория представляет собой пластовое плато, образовавшееся в результате переработки древнепалеозойских структур под действием нескольких циклов эрозии и денудации, продолжающихся до настоящего времени [3]. Карст развивается в известняках и доломитах нижнего кембрия мощностью до 400–500 м, перекрытых криогенно-эоловыми отложениями. Он широко распространен в придолинной полосе Приленского плато, а также по междуречьям Синей и ее притоков.

Рассмотрим удивительные особенности рельефа долины р.Синей, формирующиеся в условиях развития трех морфолого-генетических типов карста: голого, покрытого и задернованного.

### Поверхностные карстовые формы

В условиях голого карста на поверхности горных пород распространены специфические отрицательные наноформы карстового рельефа — *лунковые карры*. Они возникают в результате неравномерного растворения (селективной коррозии) известняков и доломитов под воздействием талых, дождевых и конденсационных вод. Карры имеют округлую и эллиптическую в плане форму,

**Ключевые слова:** карст, известняк, р.Синяя.

**Key words:** karst, limestone, r.Sinyaya.

© Трофимова Е.В., 2017

Научные союзы





Река Синяя.

их диаметр варьирует от 0,3–0,5 см до 3–4 см, глубина обычно не превышает 1–1,5 см. Увеличению лунок способствует повышенная влажность накапливающегося в них нерастворимого остатка. Лунковые карры распределены неравномерно: встречаются как отдельные образования, так и группы форм, слившиеся в одну большую карровую морфоскульптуру.

На пологих поверхностях, где вода стекает медленно, вдоль рассекающих горные породы трещин (преимущественно диагонального и ортогонального направлений) обнаружены *трещинные карры*, или так называемые известняковые тротуары. Отдельные блоки горных пород подвержены воздействию биокарста: здесь на поверхности фиксируются небольшие углубления и канавки (глубиной до 1 см), созданные коррозионной деятельностью микроорганизмов (цианобактерий, грибов, водорослей, лишайников).

Из-за активных процессов криогенного выветривания в обнажающихся известняках карры быстро разрушаются.

Еще одна необычная форма карстового рельефа, выявленная как в голом, так и в покрытом карсте, — *кораллитовые (кристаллитовые) коры* из тонковолнистых сферолитов, которые представляют собой продукты кристаллизации вторичного кальцита из неподвижных капиллярных пленок. Развитие кор происходит в условиях резко континентального климата путем кристаллизации  $\text{CaCO}_3$  из водного раствора преимущественно конденсацион-

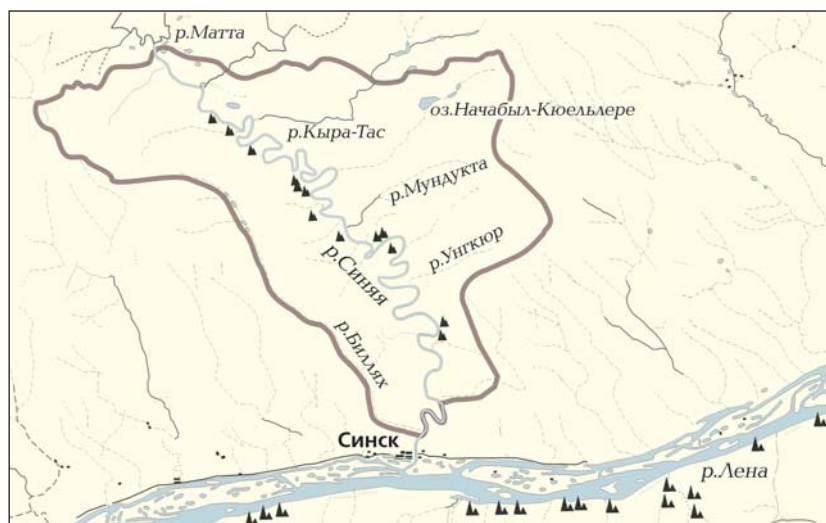


Схема долины р.Синей. Контуром показаны границы территории, которая вошла в Список всемирного наследия ЮНЕСКО. Треугольниками отмечены участки распространения Синских и Ленских столбов.





Лунковые карры (долина Синеи на участке между реками Биллях и Бытырыстах).



Кораллитовые коры (долина р. Унгкюр).

ного генезиса. Кораллитовые коры образуются в небольших углублениях (обычно в трещинах) либо в подповерхностном слое и обнажаются при денудации рыхлых отложений.

В долине Синеи распространены также *карстовые воронки*, представляющие собой замкнутые углубления овальной, округлой или неправильной формы, преимущественно конусообразные, реже асимметричные и блюдцеобразные. Их диаметр варьирует в пределах 3–5 м, глубина — от 0.5 до 2.0 м. При слиянии нескольких воронок выщелачивания образуются карстовые озера. Они имеют промерзшее дно и берега, а их глубина не превышает 2.0–2.5 м. Крупные озера расположены



Таешное озеро в междуречье рек Унгкюр и Бурдобит.



в долинах рек Кыра-Тас и Начабыл. Между собой водоемы соединяются короткими участками речных русел.

Долина Синей вытянута с северо-запада на юго-восток, русло реки сильно петляет, образуя большое количество меандров. Коэффициент извилистости на исследуемом отрезке протяженностью 190 км составляет 1.17–1.20, а между устьями рек Кыра-Тас и Начабыл достигает 1.29. В среднем течении Синей меандры свободные, в то время как в низовьях они принадлежат к типу врезанных, как и на соседнем отрезке Лены. В основании бортов долины часто можно заметить так называемые *области разгрузки надмерзлотных карстовых вод*, характерные для районов с повсеместным развитием мерзлоты. Зимой в таких местах образуются наледи. В корневой части меандров под уступами северо-западной экспозиции наледь может сохраняться до июня–июля, а с юго-восточной стороны она обычно стает уже к началу лета. На наледных полянах на свет появляется уникальное для северных широт растение, занесенное в Красную книгу Международного союза охраны природы как вид, находящийся под угрозой уничтожения: башмачок пятнистый, или кукушкины сапожки (*Cypripedium guttatum*). Очевидно, что наледи защищают поверхностный почвенный покров от сильного промерзания в особенно суровые зимы, создавая условия для появления на их месте хрупких творений природы из семейства орхидных.

Для гидрографической сети районов с развитием карста характерны *исчезающие реки и ручьи*. За исключением основного русла Синей, все

водотоки долины прерываются либо в верхнем, либо в нижнем течении (например, реки Мундукта, Кыра-Тас, Сюлюгей и др.), а реки Начабыл, Бытырстах и Унгкюр периодически исчезают и снова появляются на всем протяжении, причем в руслах отмечаются провалы в виде воронок, щелей, иногда с понорами\*. Вода в реках и ручьях необыкновенно прозрачна, в ней, как в зеркале, отражаются окружающие скалы.

## Подземные формы

По обоим берегам Синей на протяжении около 80 км высятся причудливые вертикальные скалы. Иногда это отдельные останцы, а местами — сплошная зубчатая стена. По аналогии со всемирно известным геологическим феноменом в долине Лены скалы в долине Синей названы *Синскими столбами*. Их высота достигает 180–200 м. Это своеобразная форма подземного (глубинного) карста, вскрытого долиной реки при ее эпизодическом врезании в Приленское плато. Синские каменные гиганты, так же как и Ленские, сформировались около 400 тыс. лет назад [4]. Вследствие неотектонических процессов за прошедший период территория Сибирской платформы поднялась на 200 м, что привело к глубокому врезанию долины р.Синей и к развитию карста. Он, в свою очередь, способствовал, с одной стороны, расширению естественных трещин и отчленению очередных блоков от основного массива горных пород, а с другой — формированию многочисленных *щелей, ниш, навесов, естественных арок, а также небольших пещер и коридоров*.

Из-за нескольких этапов активизации карстовых процессов выделяются столбы разного возраста. Мы можем наблюдать четыре основных типа этих образований: зарождающиеся, молодые, зрелые и старые. Все вместе они создают завораживающий природный ансамбль карстового рельефа, в моделирование которого значительный вклад вносит современное селективное выветривание, а также гравитационно-склоновые и флювиальные процессы.

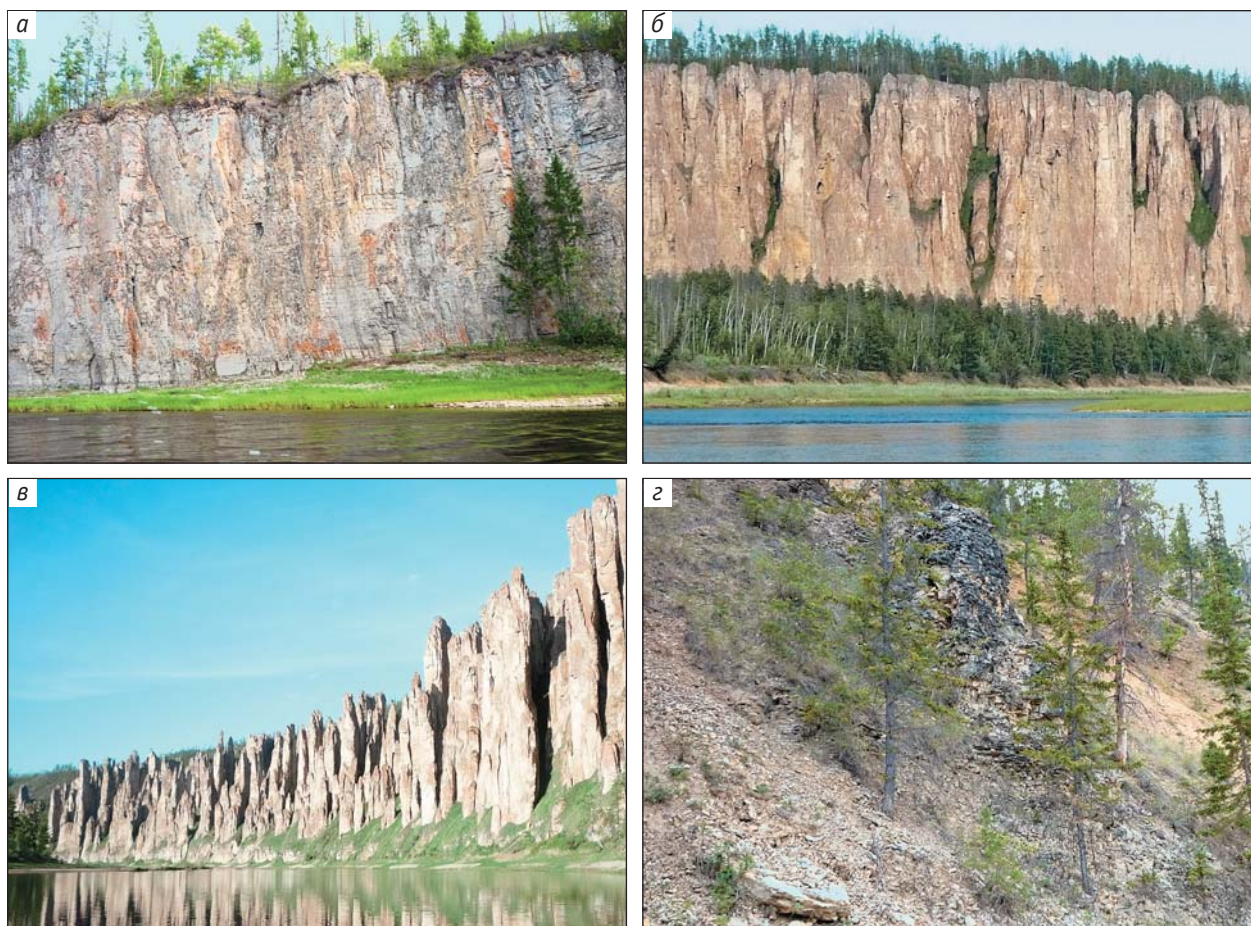
Периодическое затухание процессов врезания реки привело к формированию многочисленных пещер галерейного типа. Их образование связано



Поляна краснокнижного вида *Cypripedium guttatum* в урочище Песчанка.

\* Понор — отверстие в горных породах, поглощающее водоток и отводящее его в глубину закарстованного массива.



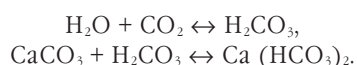


Синские столбы разных типов: зарождающиеся (а), молодые (б), зрелые (в) и старые (г).

с горизонтальной циркуляцией карстовых вод, проходящей на разных уровнях. Общая протяженность галерей обычно не превышает 8–10 м, они имеют округлую либо неправильную овальную форму в поперечном сечении. Прежние уровни подземных вод определяются по входам в пещеры, расположенным на различной высоте.

Как показали полевые исследования, в пещерах отсутствуют спелеотемы — натечные образования различной морфологии, которые часто украшают сравнительно молодые пещеры в карбонатных породах. Основная причина такого явления заключается в следующем.

Карбонат кальция, из которого состоит известняк, в дистиллированной воде практически не растворим. Когда углекислый газ (из разлагающихся растений в почве над пещерой) смешивается с водой, образуется слабая угольная кислота, в присутствии которой в воде происходит растворение карбоната кальция:



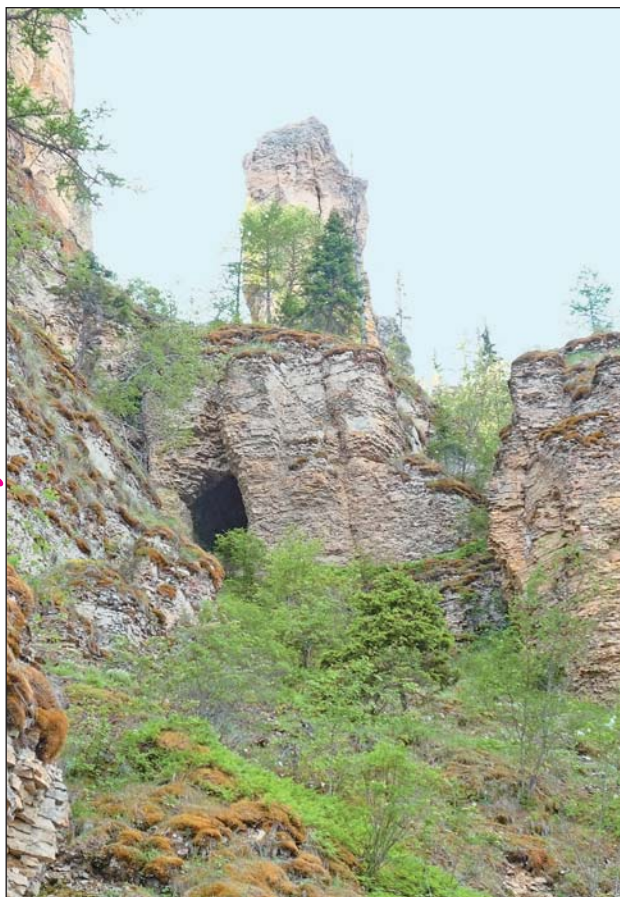
При поступлении раствора по трещинам в подземную полость создаются условия для уле-

тучивания  $\text{CO}_2$  в атмосферу пещеры, и, как следствие, имеет место обратный процесс — осаждение карбоната кальция и образование спелеотем. Осаждение известкового туфа из водного раствора происходит согласно реакции

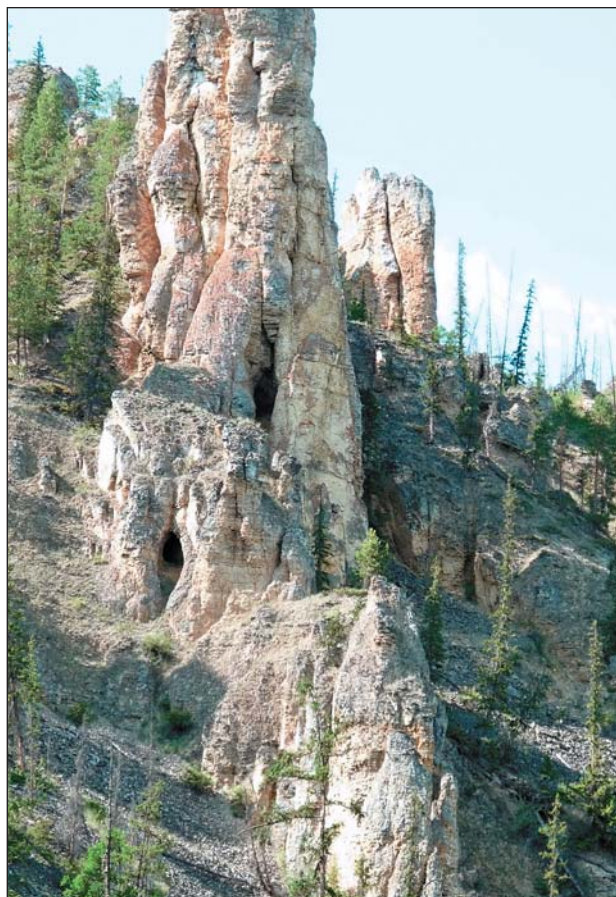


В холодных климатических условиях Сибири, вследствие пониженной активности аэробных почвенных растений, гниение и разложение органических веществ происходят крайне медленно, поэтому поступление углекислоты в просачивающиеся воды незначительно. С другой стороны, период, в течение которого вообще возможно поступление в подземную полость раствора, насыщенного бикарбонатом кальция, составляет в среднем чуть более двух месяцев (такова здесь продолжительность безморозного периода). В теплое время года в пределах рассматриваемой территории выпадает менее 200 мм осадков, при высоком, как отмечает М.К.Гаврилова, испарении: по ее данным, летом испарение в Центральной Якутии превышает количество осадков «в 4 раза, а иногда и больше» [5, с.86]. К тому же, как следует из результатов полевых гео-





Подземные галереи в районе урочища Песчанка.



Разноуровневые пещеры недалеко от устья р.Сылбах.

криологических работ, проведенных С.П.Варламовым и др., в районе исследований в теплый период влажность напочвенных покровов в целом весьма невелика: ее значения зависят от местоположения в рельефе и литологического состава почвогрунтов, в среднем варьируя от 6–8 до 19–38% [6].

Соответственно, в пещерах долины р.Синей отсутствуют физико-географические условия для образования спелеотем: в подземных полостях фиксируются только остаточные либо обвальные отложения. Тем не менее мир неведомого подземного пространства притягивает к себе путешест-

венников и местных жителей — в пещерах бывает немало посетителей!

В 2012 г. в левом борту долины Синей, в нескольких километрах от устья ее правого притока — р.Биллях, был заложен габбро-диоритовый карьер. Однако уже в 2013 г. под давлением местных жителей ускорилась работа по внесению долины р.Синей в Список всемирного наследия. В июле 2015 г., после 39-й сессии ЮНЕСКО, подержавшей включение долины в Список, создание карьера приостановили.

Живи, чарующая своей красотой, величественная сибирская река! ■

## Литература

1. Всемирное наследие: Информационный сборник. Париж, 2005.
2. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., 1989.
3. Геология Якутской АССР. М., 1981.
4. Спектор В.В., Толстихин О.Н. Ленские столбы // Наука и техника в Якутии. 2004. №1. С.101–106.
5. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов Земли. Якутск, 1998.
6. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. Якутск, 2002.

# Стены и башни древнего Изборска

Н.В.Лопатин,  
кандидат исторических наук  
Институт археологии РАН  
Москва

Изборск — одно из красивейших мест северо-запада России, расположенное в 30 км от Пскова. Главная достопримечательность Изборска — величественные городские стены и башни XIV–XV вв., хорошо сохранившиеся до наших дней. Однако не менее интересен здесь другой памятник истории — Труворово городище, где летописный город располагался ранее. Н.К.Рерих так отзывался об этих местах в 1903 г.: «Подле существующих городов часто указывают древнее городище, и всегда оно окажется гораздо красивее расположенным, нежели позднейший город. Знал

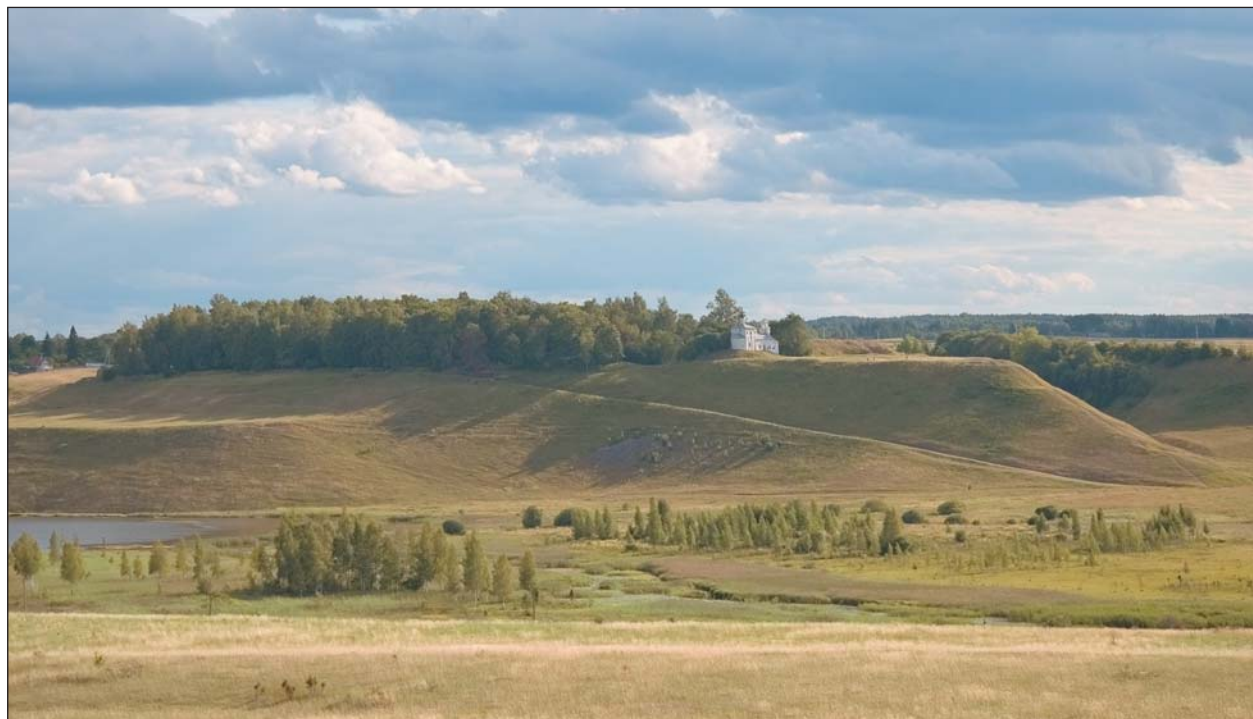
Трувор, где сесть под Изборском, у Словенского Ручья, и гораздо хуже решили задачу псковичи, перенесшие городок на гору Жераву» [1].

Городище изучалось в 1971–1992 гг. экспедицией Института археологии Академии наук СССР под руководством знаменитого ученого-слависта В.В.Седова (1924–2004). Основные результаты раскопок изложены в его книге, изданной посмертно [2]. За годы работы экспедиции получена коллекция находок численностью более 10 тыс., не считая массовых фрагментов керамики. Раскопана почти вся жилая территория города; изучены вал, ров, сооружения въездов. Одним из значительных открытий стали остатки стен и башен раннесредневекового города, о которых до раскопок не было известно ничего. Точнее, никто не сомневался, что укрепления на этом месте были. Но какие?

**Ключевые слова:** Изборск, Труворово городище, башня, въезд, ворота, фортификация, археологические раскопки.

**Key words:** Izborsk, Truvor fortified settlement, tower, entrance, gates, fortification, archaeological excavations.

© Лопатин Н.В., 2017



Труворово городище в Изборске. Вид с северо-востока.

Фото Г.Н. Лебедева.





В.В.Седов. 2001 г.

Историк начала XIX в. митрополит Евгений (Болховитинов) подробно обследовал Изборск с окрестностями в поисках того места, где, согласно летописи, сел княжить легендарный Трувор, брат Рюрика, и пришел к выводу: «Городище сие очень тесно..., но для замка Труворова с дружиною и для предосторожности от новых его подданных могло быть достаточно и надежно» [3, с.138].

По-видимому, сообщение летописи о княжении Трувора в Изборске иносказательно отражает реальность более позднего времени — начала XI в., когда молодой князь Ярослав Владимирович, посаженный своим отцом княжить в Новгород, пла-

нировал расширить свои владения на запад, в чудские земли, опираясь на пограничный Изборск [4]. Еще позднее, во времена противостояния Руси с Ливонским орденом, Изборск, не раз упоминаемый и в русских летописях, и в Ливонской рифмованной хронике, в 13-м столетии и в начале 14-го все еще находился на Труворовом городище. Поэтому так важно знать, что представляла из себя эта крепость.

Изборский художник П.Д.Мельников изобразил крепость на городище как грандиозное деревянное сооружение. На его картине облик древнейшего Изборска, воскрешенный из небытия, явно навеян образами русской исторической живописи, особенно Н.К.Рериха, а также видами позднейшей изборской каменной крепости. Однако археологические раскопки выявили нечто иное.

Начиная с 1974 г. при исследовании края площадки городищенского холма постепенно раскрывались остатки каменных кладок крепостных стен высотой более 1 м, сохранившихся под землей (в культурном слое) [2, с.147–165]. Они сложены из местного известняка без применения строительного раствора; лишь местами зафиксировано, что швы между камнями были заполнены глиной (в подобной технике местные жители до сих пор сооружают хозяйственные постройки и фундаменты жилых домов). Относительно хорошо сохранилась лицевая кладка, обращенная внутрь города [5, рис.40]. Внешний фасад, находившийся на краю обрыва, практически везде осыпался. Середину сооружения занимала забутовка из рваных обломков того же камня и щебня. Ширина стены — от 2,5 до 4 м, а высота, скорее всего, была меньше. Таким образом, это каменное сооружение более уместно называть цоколем, на верхней плоскости которого была установлена деревянная оборонительная стена.

На стрелке мыса раскрыто полукруглое основание башни, составлявшее единое целое с цоколем стены. Башня имела прямоугольный подвал, к ней примыкали два узких прохода в стене, один из которых вел к самой башне (очевидно, в нем была установлена деревянная лестница, ведущая на высокий первый этаж), а другой — сквозь стену наружу (тайный выход).

Седов отнес возведение каменных укреплений к рубежу XI–XII вв., однако результаты раскопок ряда участков на заключительном этапе работы экспедиции (западные ворота, а также разрез остатков западного прясла стены, выполненный в 2012 г.) позволяют удревнить начало этого строитель-

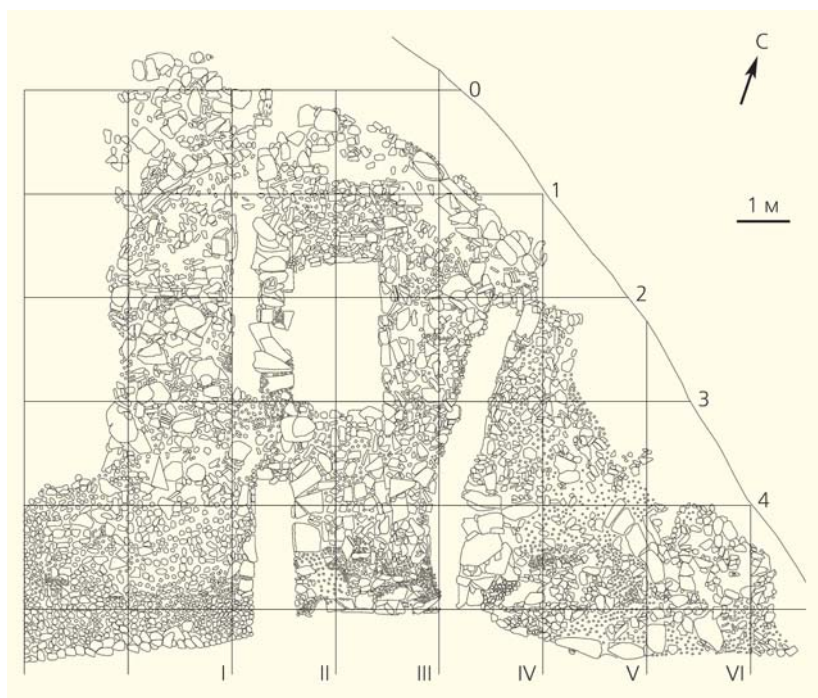


Возвращение из похода. Художник П.Д.Мельников. 1965 г. Холст, масло. Государственный музей-заповедник «Изборск».

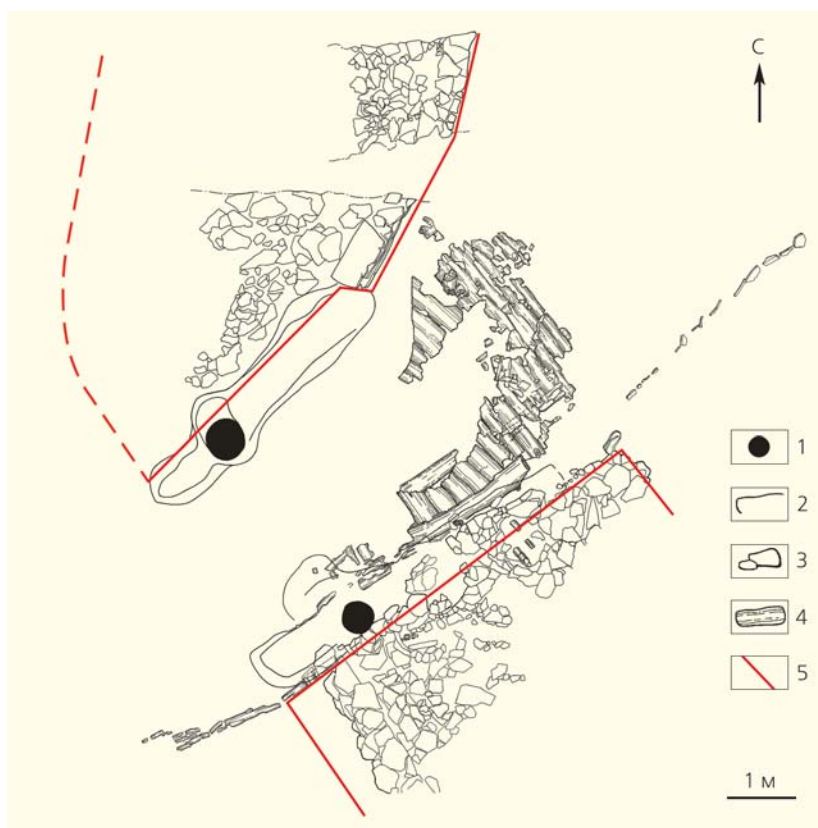


ва на целое столетие (конец X в.) [6, с.126–131]. За три с лишним века функционирования этих укреплений они не раз разрушались и отстраивались. Разрез вала в самой высокой (6 м) — южной — части показал, что таких основных этапов строительства было не менее семи. В начале XIII в. вал был существенно подсыпан известняковым щебнем при одновременном углублении рва, расположенного с внешней южной стороны города. После этого новая каменная стена проходила уже по гребню вала, в толще которого сохранилась стратиграфия укреплений, доступная для изучения. Стены, стоявшие вдоль обрывистого края площадки, были разобраны при переносе города на Жеравью гору в 1330 г., а окончательно это произошло, возможно, и позднее, когда там в XVI–XVII вв. существовал мужской монастырь. Таким образом, остатки каменного цоколя стены, открытые раскопками, главным образом относятся к древнейшему строительному горизонту, укрытому наросшим культурным слоем.

Поскольку остатки оборонительных сооружений находятся в плохой сохранности, реконструкция их первоначального внешнего облика должна вестись с большой осторожностью, с учетом всех деталей, зафиксированных при раскопках. Остановимся здесь на одном из элементов крепости — западных въездных воротах, исследовании которых в 1987–1992 гг. непосредственно руководил автор этих строк. В разрезе западного отрога вала мы обнаружили стратиграфию, сходную с вышеописанной, а в нижнем горизонте изучили руины двух пилонов каменного цоколя, на которые опиралась конструкция деревянных ворот и стен. Проезд в стене шириной 2,5 м (между двумя мощными деревянными столбами) был обустроен деревянной мостовой, сгоревшей в пожаре. По окончании раскопок древние руины мы обозна-



План каменной кладки стены и основания башни на мысу Труворова городища [2, рис.168].



План остатков нижнего горизонта западных ворот: 1 — столбовые ямы; 2 — контуры канав; 3 — камни; 4 — обугленное дерево; 5 — реконструкция контуров каменных пилонов.





Труворово городище. Внутренняя лицевая кладка западного прясла стены [5, рис.40].

чили на поверхности консервационной кладкой из подобного же камня, а новые деревянные столбы поставили в подлинные столбовые ямы.

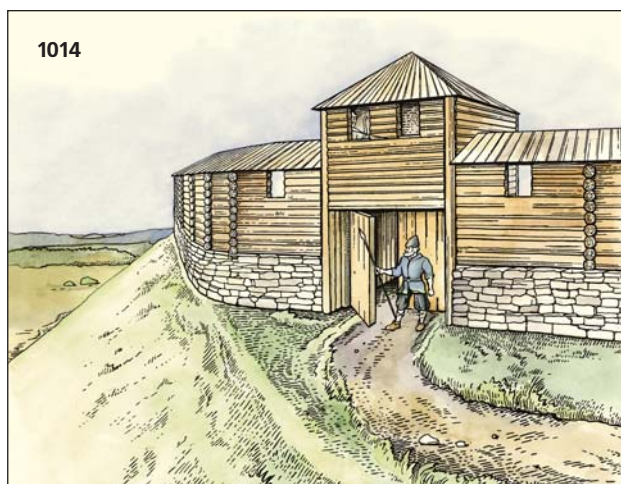
Раскопная документация позволяет графически реконструировать целый ряд дополнительных деталей строения въездных ворот. Наиболее представительными данными для реконструкции обеспечены два строительных периода — начала XI в. и первой половины XIII в. Допустимо соотнести их

с конкретными историческими событиями, которые уже упомянуты выше. Первый — с новгородским княжением молодого Ярослава (Мудрого), который, предположительно, обустроил здесь свою «военную базу». Второй из выбранных периодов соответствует времени первых достоверных летописных известий об Изборске — 1233 и 1240 гг., когда город был дважды взят ливонскими рыцарями в ходе их столкновений с Псковом и Новгоро-



Западные ворота на городище, обозначенные на месте раскопа. 2008 г.

Фото автора



Западные въездные ворота Изборска. Реконструкция Н.В.Лопатина. Консультант Вл.В.Седов. Рисунки Н.С.Сафроновой.

дом [7, с.72, 77]. В материалах раскопок засвидетельствованы следующие детали конструкции «ворот 1014 года»: каменный цоколь высотой чуть более метра с незначительными остатками дерева на его поверхности; две канавы от стен из вертикальных бревен по бокам проезда; ямы от двух мощных воротных столбов, отодвинутых от лицевой линии ворот вглубь на 1 м; среди обугленных фрагментов отмечена древесина дуба. Другие элементы облика ворот выстроены исходя из конструктивной и функциональной логики сооружения, а также по аналогии с другими памятниками древнерусской фортификации. Деревянная стена, стоявшая на цоколе, должна была, очевидно, состоять из срубных клеток. Протяженность стен, фланкирующих проезд, — 4 и 5 м. Они облицовывали торцы каменных пилонов и одновременно могли служить опорой для надвратной башни, включенной в единую линию обороны.

«Ворота 1233 года» располагались тремя метрами дальше от края площадки и на 1 м выше уровнем, поверх выровненных развалов более ранних

сооружений [8]. Въездная дорога в то время проходила в седловине высокого вала, огибая его крутой и высокий склон. Вместо каменного цоколя была сооружена срубная городня-платформа, примыкающая к склону вала и заполненная глинистым грунтом с камнями и щебнем. По верхнему краю платформы проходила оборонительная стена из вертикально поставленных бревен, несколько позволяет судить направление их упавших фрагментов. Названные деревянные конструкции сохранились фрагментарно в обугленном и обрубленном состоянии, поскольку сооружение погибло в пожаре. Часть обгоревших кусков дерева принадлежала, скорее всего, прямоугольной надвратной башне, размерами подобной более ранней. О высоте башни судить трудно, но нет никаких особых оснований предполагать, что она имела более одного боевого яруса.

Вопросы всесторонней реконструкции и датировки фортификаций Труворова городища, а также истории Изборска в этот период ждут дальнейшего изучения. ■

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда. Проект 16-01-00265.

## Литература

1. Рерих Н.К. Старина. IV // Новое время. 1903. 23 декабря / 1904. 5 января. №9988. С.2–3.
2. Седов В.В. Изборск в раннем Средневековье. М., 2007.
3. Евгений, митрополит. Летопись древнего славено-русского княжеского города Изборска // Труды и летописи Общества истории и древностей российских. Ч.V. Кн.1. М., 1830.
4. Лопатин Н.В. Изборск и Варяжское сказание // Российская история. 2016. №5. С.124–139.
5. Седов В.В. Изборская экспедиция Института археологии АН СССР. Отчет о работе 1975 г. // Архив ИА РАН. Ф-1. Р-1. №5325.
6. Лопатин Н.В. Изборск // Русь в IX–X веках: археологическая панорама. М.; Вологда, 2012. С.122–137.
7. Новгородская первая летопись старшего и младшего изводов / Ред. А.Н.Насонов. М.; Л., 1950.
8. Лопатин Н.В. О крепостных сооружениях Изборска начала XIII в. // Российская археология. 2016. №1. С.123–130.



# Урочище Кизил–Коба — жемчужина Горного Крыма

*Есть в стране киммерян пустая гора с каменистой  
Мрачной пещерой; издавна там Сон обитает ленивый.  
Феб не сияет; лишь тонкий туман, от земли поднимаясь,  
Влажной стелется мглой, и сумрак сомнительный светит.  
Медленной струйкой Летийский ручей, по хрящу пробираясь,  
Слабым, чуть слышимым журчаньем сладко наводит дремоту...*

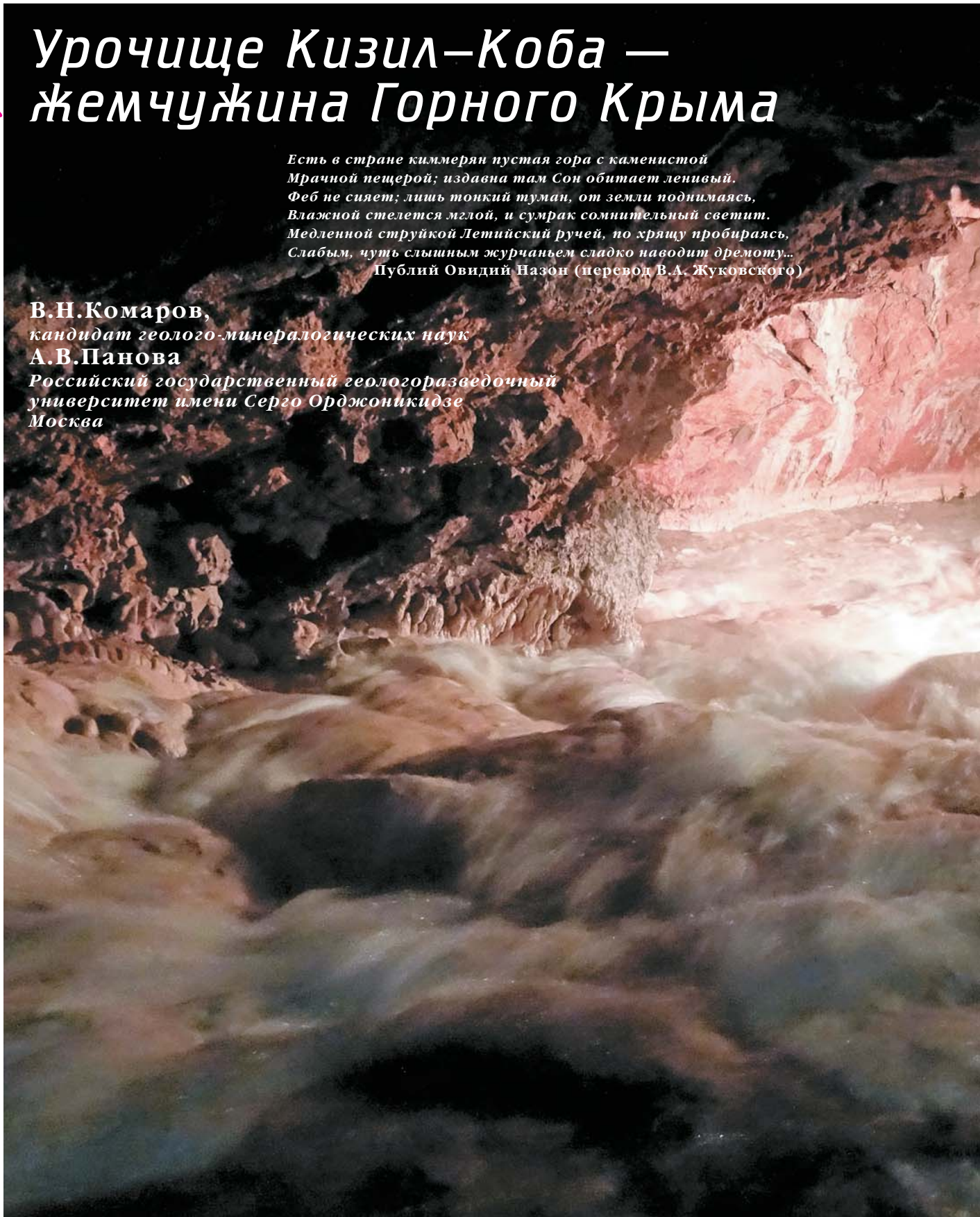
Публий Овидий Назон (перевод В.А. Жуковского)

**В.Н.Комаров,**

кандидат геолого-минералогических наук

**А.В.Панова**

Российский государственный геологоразведочный  
университет имени Серго Орджоникидзе  
Москва







Подземная река в пещере Кизил-Коба — самой протяженной в Европе.

Фото А.В.Пановой

Горный Крым — край уникальных природных и исторических памятников. В самом его сердце, на северо-западном склоне Долгоруковского массива, примерно в 3 км от села Перевального, располагается урочище Кизил-Коба (в переводе с тюркского Красная пещера). Здесь находится и одноименная пещера, которая с полным основанием считается одним из удивительнейших феноменов региона [1–5].

Живописная тропа к пещере идет вдоль узкого, глубоко врезанного в толщу верхнеюрских известняков ущелья, которое создали воды небольшой горной реки Су-Учхан (Падающая вода), она же Кизилкобинка или Краснопещерная. Породы повсеместно окрашены соединениями железа в красновато-коричневый, иногда розовый цвет. Отсюда и название местных утесов — Кизил-Кая (Красные скалы). Склоны ущелья утопают в зелени деревьев и кустарников, поднимающихся почти до верхней кромки Долгоруковского плато. В верховьях ущелья возвышается Туфовая площадка, сложенная известковыми туфами, объем которых здесь самый большой во всем Горном Крыму (достигает 400 тыс. м³) [4]. Этот массив — величественный памятник протекающей в пещере реки. Она, вырываясь из мглы подземного царства, в течение многих тысячелетий выносит из глубин Долгоруковского плато растворенный карбонат кальция и откладывает его. Поскольку туф хороший строительный материал, в 1905–1907 гг. в этих местах велась его разработка. Ее инициатором выступил князь В.М.Долгоруков [4].

С обрывистого склона площадки река низвергается более чем 25-метровым водопадом, который, как и река, называется Су-Учхан. В ясный день отсюда в юго-западном направлении открывается величественная панорама. Внизу — заросшее лесом ущелье, по его дну струится Су-Учхан, далее плодородная долина верховьев р.Салгир. На горизонте вырисовывается четкая вереница вершин Главной горной гряды Крымских гор.

На различной высоте над Туфовой площадкой в обрывах скал располагаются три входа в Кизил-Кобу. В 17 м над площадкой находится арка нижнего этажа — Харанлых-Коба (Темная пещера), через которую посетители попадают в благоустроенную часть подземного музея-заповедника (экскурсионный маршрут протяженностью около 500 м действует здесь с 1989 г.). Выше по склону (в 50 м над Туфовой площадкой) расположен небольшой треугольный вход Илье-Кобы (Ветреной пещеры). Еще выше (в 70 м над площадкой) и несколько в стороне — отверстие малозаметной пещеры, носящей название Ромашка.

Кизил-Коба состоит из шести этажей. Пещера Харанлых-Коба — трехэтажная. Илье-Коба имеет два этажа в виде узких и очень запутанных, слабо наклоненных ходов. Ромашка составляет шестой

Заметки и наблюдения





Окрестности урочища Кизил-Коба.

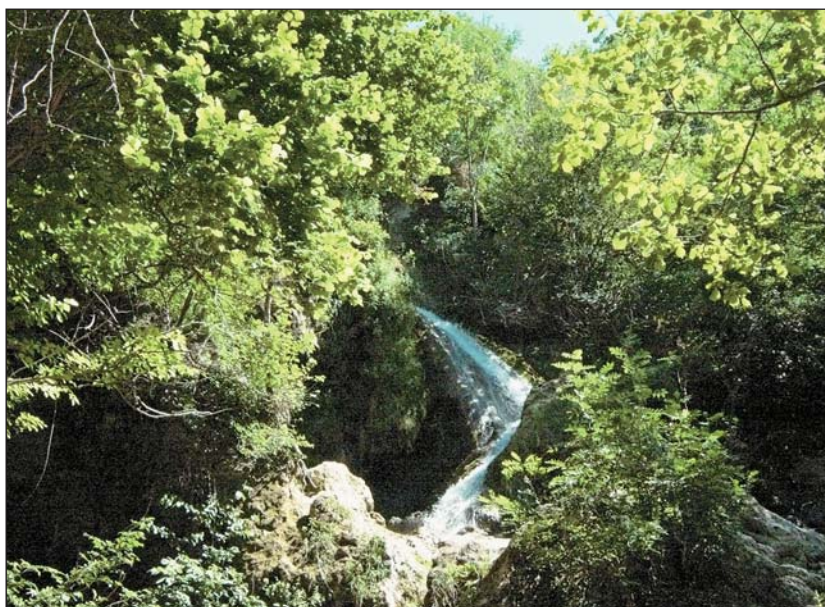
Здесь и далее фото В.Н.Комарова

этаж. Все уровни соединяются между собой отдельными колодцами, образуя сложный лабиринт. Относительное превышение одного уровня над другим меняется от 4 до 10 м. В верхних этажах сухо, вода там практически прекратила свою работу. Нижние же обводненные части пещеры переживают эпоху активного карстового развития, за счет чего Кизил-Коба постоянно увеличивается

в размерах. Возраст ее, по оценкам ученых, составляет около 2,5 млн лет. Общая длина доступных галерей — более 27 км. По протяженности эта пещера занимает первое место в Европе.

Здесь располагаются грандиозные обвальные залы и галереи длиной 70–80 м и шириной до 20–25 м. Их потолки теряются на высоте многих десятков метров. Многочисленны и разнообразны

сталактиты, сталагмиты, колонны высотой до 12–18 м и диаметром 5–6 м. В пещере находится один из самых больших сталактитов в Европе. Его длина составляет около 8 м, а возраст — около 8 тыс. лет. Не менее удивительны натечные отложения в виде бахромы, драпировок, занавесей, обязанные своим рождением просачиванию воды. Столь же эффектны кальцитовые отложения в виде натечных плотин. На протяжении 340 м в Кизил-Кобе насчитывается 36 плотин длиной от 3 до 13 м [4]. Иногда они образуют своего рода мосты, перегораживающие галереи на высоте от 0,2–0,5 до 2 м над современной поверхностью реки. В нижнем этаже пещеры насчитывается несколько сотен проточных озер. Площадь некоторых из них достигает 500 м<sup>2</sup>



Водопад Су-Учхан.

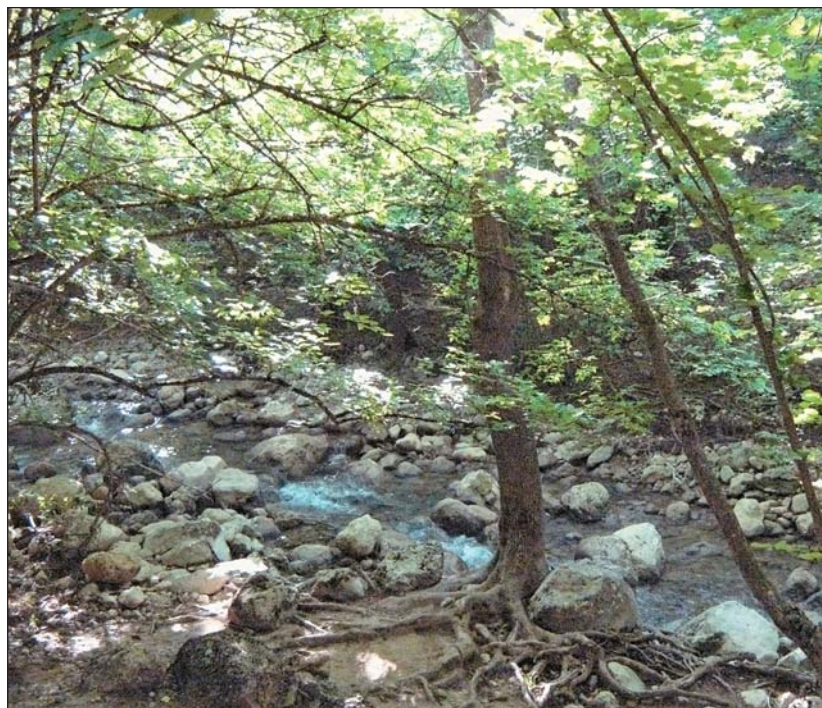


при глубине более 3 м [3]. В паводок уровень воды в озерах поднимается на 1,5–2,5 м, а иногда и на 6–7 м. Запасы подземных вод в пещере в зависимости от времени года колеблются от 15 тыс. до 250 тыс. м<sup>3</sup> [3].

Первые письменные сведения о Кизил-Кобе содержатся в книге П.И.Сумарокова «Досуги крымского судьи, или Второе путешествие в Тавриду», вышедшей в свет в Санкт-Петербурге в 1803 г. В 1825 г. Симферополь посетил А.С.Грибоедов, который 24 июня побывал в Кизил-Кобе. В память об этом событии одна из галерей пещеры названа Грибоедовской. В 1843 г. описание пещеры опубликовал швейцарский натуралист Ф.Дюбуа де Монпере [4].

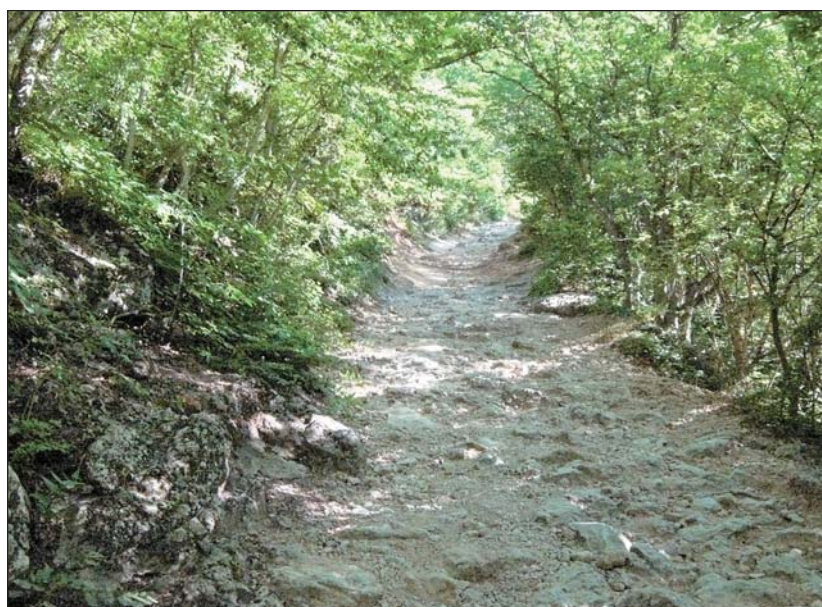
Начало археологического исследования Кизил-Кобинского урочища связано с именем К.С.Мережковского. В 1879 г. он осмотрел пещеру и отметил, что Харанлых-Коба, вероятно, была необитаема, так как промывается потоками воды. В Илье-Кобе условия для жизни человека более благоприятны, однако и здесь никаких следов пребывания людей нет. В 1914 г. пещеру Харанлых-Коба обследовал археолог и краевед С.И.Забнин. В ее правой, возвышенной и незатопляемой части он обнаружил три культурных горизонта. В верхнем найдены обломки римских амфор, а в среднем — обожженные кости животных и глиняные черепки посуды скифо-сарматского времени. В нижнем горизонте зафиксированы кремневые отбойники, серповидные пилы, наконечники копий, скребки, костяные заколки, раковины с просверленными отверстиями, черепки грубой глиняной посуды, которые Забнин выделил в особый тип древней керамики. Здесь же выявлены прослойки золы — следы древнего очага. Так была открыта ранее неизвестная археологическая культура, которая, как показали дальнейшие исследования, обладала ярко выраженными специфическими культурно-историческими признаками.

В 1921 г. в раскопках, помимо Забнина, приняли участие археологи Г.А.Бонч-Осмолов-



Каменистое русло р.Су-Учхан.

ский и Н.Л.Эрнст. Им удалось обнаружить на Туфовой площадке несколько зерновых ям. Раскопки 1924 г. установили, что следы пребывания древнего человека есть и в Илье-Кобе. В том же году на Туфовой площадке вскрыли еще две зерновые ямы, землянку и три грунтовых погребения: два детских и одно — взрослого человека [1]. Дальнейшее изучение памятников Кизил-Кобин-

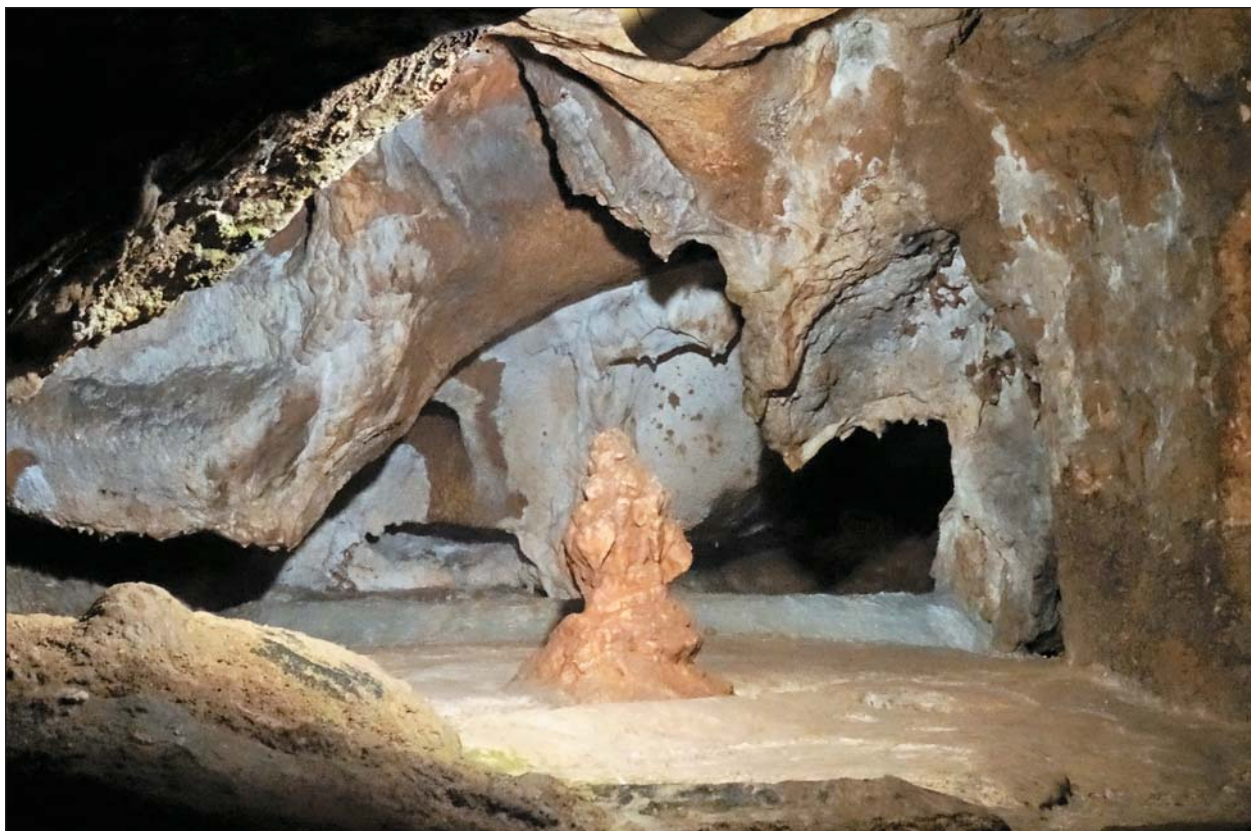


Живописная тропа к пещере Кизил-Коба.

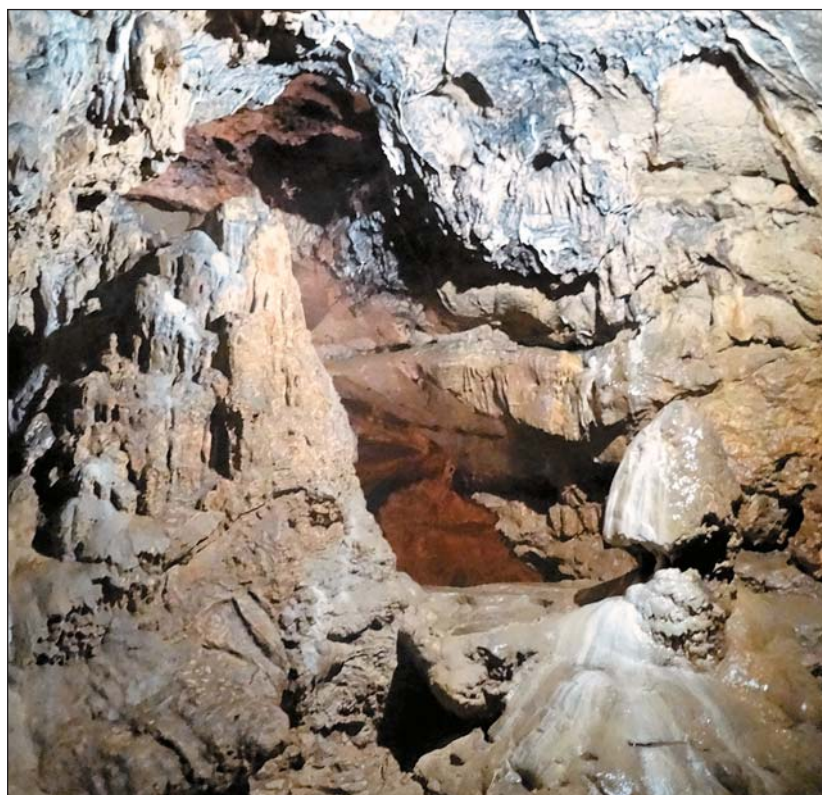








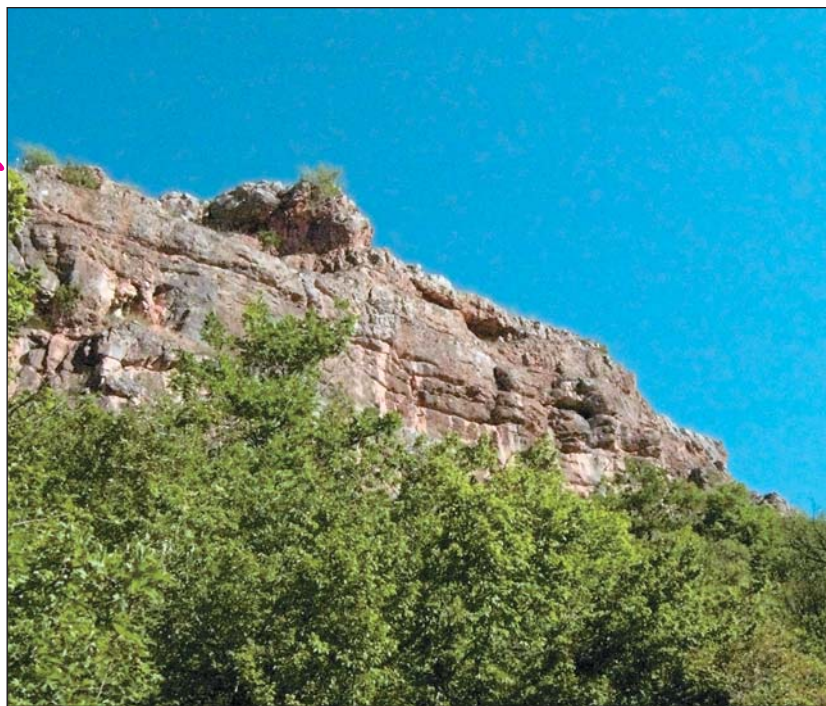
ского урочища возобновилось лишь в 1958 г., когда была создана Комплексная карстовая экспедиция. Входивший в ее состав археологический отряд провел раскопки в Харанлых-Кобе и в Илье-Кобе. Тогда удалось выяснить, что урочище заселялось на протяжении нескольких исторических эпох, а сама пещера интенсивно использовалась человеком. В Харанлых-Кобе собрали множество обломков амфор, глиняных горшков, кувшинов, лепных мисок, краснолаковых чашек. Большинство амфор стояло в пещере вдоль стен. В Илье-Кобе археологических находок оказалось меньше. Они представлены обломками лепных горшков, мисок и ковшиков позднескифского облика (III–IV вв.). Кроме того, на Туфовой площадке обнаружили основания стен довольно крупной постройки III–IV вв. Хозяин найденной усадьбы в числе прочего занимался виноградарством, а вино хранил в пещере — естественной кладовой. Об этом



Различные формы кальцитового убранства в пещере.

Фото А.В.Пановой





Верхние отвесные обрывы горного массива Кизил-Кая, сложенные верхнеюрскими известняками.

Фото В.Н.Комарова

свидетельствовали обломки амфор со следами винного осадка.

По научной значимости важнейшее место, несомненно, занимают наиболее древние находки, связанные с нижним культурным слоем. До раскопок 1914 г. подобного материала археологи не встречали. Возраст артефактов и их культурную принадлежность удалось определить не сразу. В 1926 г. Бонч-Осмоловский выделил их в особую культуру, которая по месту первых находок была названа «кизилкобинской» [1]. Определяющий ее элемент — керамика, среди остатков которой выделяются лощеные черепки преимущественно черного или красновато-коричневого цвета и более грубые, с шероховатой поверхностью. Типичен для кизилкобинской культуры и особый геометрический орнамент: глубоко продавленные или прорезанные линии, треугольники, ромбы и другие фигуры в сочетании с ямочными вдавлениями. Следует отметить, что кизилкобинцы не знали гончарного круга, их керамика изготовлена вручную [1].

## Литература

1. Бонч-Осмоловский Г.А. Доисторическое прошлое Крыма. Симферополь, 1929.
2. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л., 1977.
3. Ена В.Г. Заповедные ландшафты Крыма. Симферополь, 1989.
4. Щепинский А.А. Красные пещеры: Долгоруковская яйла. Симферополь, 1987.
5. Исигов В.П., Литвинов П.А., Литвинова Г.Б. Атлас достопримечательностей Крыма. Судак, 2008.

Представители кизилкобинской культуры владели литейным, прядильным и ткацким делом. Помимо керамики (на долю которой приходится не менее 80% всех находок) для данной культуры характерны металлические орудия — железные мечи и ножи, бронзовые наконечники стрел, а также шилья, браслеты и зеркала. Из каменных орудий известны треугольные ножи с вогнутым лезвием, серпы, ножевидные пластины, отбойники, зернотерки, молотки, топоры. Костяные изделия (проколки, иглы с ушками) редки. На сегодняшний день принято считать, что находки из Кизил-Кобы относятся к эпохе раннего железного века (VII — начало VI в. до н.э.). На основе анализа всех имеющихся материалов (памятников кизилкобинской культуры в Крыму насчитывается сейчас более 200) удалось выяснить, что кизилкобинцы появились в Крыму примерно 2800 лет назад — в конце

IX–VIII вв. до н.э., а сошли с исторической сцены около III–II вв. до н.э. [4]. Они занимались земледелием, скотоводством, охотой, а в приморской зоне и рыболовством.

Для кизилкобинцев ущелье с рекой, обильно орошающей окрестные поля, было священным местом, а пещера Кизил-Коба — святилищем скотоводческо-земледельческого культа, естественным храмом. Здесь происходили жертвоприношения животных. Сосуды служили, очевидно, для жертвенных яств. Зерно, хранившееся в небольших зерновых ямах, — также, скорее всего, ритуальное. Использовалось оно, по-видимому, во время религиозных обрядов, связанных с культом плодородия и обожествлением воды.

Кизилкобинское урочище неповторимо во всех своих проявлениях — в мелодичности журчания горной реки, в рекордной протяженности галерей пещеры, в красотах подземного мира и в какой-то неуловимой недосказанности, сулящей в будущем новые неожиданные открытия. ■

# ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2016 ГОДА

*По физике — Д.Таулесс, Д.Холдейн, М.Костерлиц*

В этом году Нобелевская премия по физике присуждена трем ученым, родившимся в Великобритании, но давно работающим в США: Дэвиду Таулессу, Дункану Холдейну и Майклу Костерлицу — за «теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи».

Дэвид Таулесс (David J.Thouless) родился в шотландском городе Бирсдене, пригороде Глазго, 21 сентября 1934 г. Выпускник Кембриджского университета, он защитил диссертацию по физике в Корнельском университете (Итака, США) под руководством Х.Бете (1958), затем занял позицию постдока в Калифорнийском университете (Беркли, США), в 1965 г. стал профессором Бирмингемского университета на родине, в 1979 г. — Йельского университета (Нью-Хейвен, США), а с 1980 г. работает в Университете штата Вашингтон (Сиэтл, США), будучи сейчас почетным профессором физического факультета. Член Лондонского королевского общества, Американского физического общества, Американской академии искусств и наук и Национальной академии наук США.

Дункан Холдейн (F.Duncan M.Haldane) родился в Лондоне 14 сентября 1951 г., образование и ученую степень по физике (1978) под руководством Ф.Андерсона получил в Кембриджском университете. После защиты четыре года был сотрудником Института имени Лауэ и Ланжевена во Франции, затем переехал в США, где работал в Университете Южной Калифорнии, в Bell Telephone Laboratories и, наконец, в Принстонском университете, профессором физического факультета которого он остается и поныне. Член Лондонского королевского общества, Американской академии искусств и наук, Американского физического общества, Института физики (Великобритания), Американской ассоциации содействия развитию науки.

Майкл Костерлиц (J.Michael Kosterlitz) родился в шотландском городе Абердин 22 июня 1942 г. Его отец, знаменитый биохимик Ханс Костерлиц, эмигрировал с семьей из Германии в 1934 г. В 1966 г. Майкл окончил Кембриджский университет, в 1969 г. защитил диссертацию в Оксфордском университете по физике высоких энергий. Проработал ряд лет в Бирмингемском университете,



Дэвид Таулесс.



Дункан Холдейн.



Майкл Костерлиц.



сменив в 1971 г. научную тематику, а затем уехал в США, где в разное время был исследователем и преподавателем в Корнельском, Принстонском, Гарвардском университетах, Bell Telephone Laboratories. С 1982 г. — профессор Брауновского университета (Провиденс). Член Американского физического общества и Американской академии искусств и наук.

Возникновение определенных свойств твердых и жидких веществ, таких как сверхпроводимость, сверхтекучесть, ферромагнетизм и др., согласно Л.Д.Ландау, принято описывать как возникновение порядка из неупорядоченного состояния — порядка, который спонтанно, т.е. без внешних воздействий, нарушает симметрию системы. Порядок, нарушающий симметрию беспорядка, — звучит парадоксально. Но это в самом деле так.

Например, переход из жидкого состояния в кристаллическое со строго периодическим пространственным расположением атомов ликвидирует симметрию по отношению к произвольным сдвигам и поворотам, характерную для жидкости с ее беспорядочным, хаотическим атомарным распределением. Кристалл совпадает сам с собой только при определенных поворотах и сдвигах, тогда как жидкость — при любых. Поэтому хаотическое жидкое состояние существенно более симметрично, нежели упорядоченное кристаллическое.

Магнитное упорядочение убирает симметрию по отношению к обращению времени, поскольку при течении времени вспять меняется направление электрических токов и, следовательно, направление создаваемых ими магнитных моментов и полей. Для неупорядоченного, или парамагнитного, состояния вещества характерно хаотическое пространственное распределение атомарных магнитных моментов. Поэтому обращение направления времени не меняет состояния системы с нулевым магнитным моментом, тогда как в ферромагнитном состоянии все атомарные моменты упорядочиваются вдоль одного определенного направления. Тем самым изменение направления времени меняет направление магнитного момента системы, что порождает асимметрию относительно обращения направления времени.

Переход в сверхпроводящее состояние связан с нарушением так называемой калибровочной инвариантности — с появлением зависимости состояния вещества от фазы волновой функции частиц, образующих сверхтекучий конденсат.

Оказалось, однако, что не все виды упорядоченных состояний могут быть описаны в рамках концепции исчезновения какой-либо конкретной симметрии. В работах трех авторов, удостоенных Нобелевской премии, развиты теории именно таких упорядоченных состояний вещества, которые возникают БЕЗ спонтанного нарушения симметрии:

— в сверхпроводящих, магнитных или кристаллических пленках;

— в двумерном электронном газе в полупроводниковых гетероструктурах (что порождает удивительное явление квантования холловского сопротивления);

— в цепочках частиц с целочисленным спином с антиферромагнитным взаимодействием, имеющих энергетическую щель в спектре возбуждений.

Начнем с работ 1972–1973 гг., в которых Костерлиц и Таулесс развили теорию фазовых переходов в двумерных системах, таких как пленки жидкого гелия, сверхпроводящие пленки и двумерные планарные магнетики [1, 2]. В чем же состоит отличие фазовых переходов в пленках от фазовых переходов в обычных трехмерных системах? Чтобы не вдаваться в математические тонкости, проще всего это понять на примере всем известного фазового перехода плавления, т.е. перехода из твердого кристаллического в жидкое состояние вещества. Кристалл характеризуется периодическим пространственным распределением атомов и определенной симметрией относительно пространственных сдвигов и поворотов. Атомы совершают колебания около положений равновесия, амплитуда которых возрастает с температурой, и при некоторой температуре атомы покидают свои равновесные положения — происходит переход в жидкое состояние. Таким образом, пропадает строго периодический дальний порядок и вместе с ним пропадает еще одно существенное свойство твердого тела — исчезает модуль сдвига, т.е. способность твердого тела сопротивляться не только сжатию, но и сдвигу одного его слоя относительно другого.

Чем отличается от объемного кристаллического упорядочение в пленке? Еще в довоенные годы Ландау и Пайерлсом было показано, что в двумерном случае нет кристаллического дальнего порядка. Если в трехмерном кристалле одинаковые атомы колеблются около строго эквидистантных положений равновесия, то в пленке эта эквидистантность нарушена. Кристаллический порядок слегка поплыл, исчезла возможность приписать каждому атому равновесное положение. Оказывается, однако, что корреляция расположений атомов относительно друг друга убывает достаточно медленно, как степенная функция расстояния между ними, т.е. упорядочение частично сохраняется. В следствие чего в таком упорядоченном состоянии без дальнего порядка имеется конечный модуль сдвига, что и отличает это состояние от жидкости. Как же и при какой температуре происходит фазовый переход плавления? Было показано, что это происходит путем разрушения ближнего кристаллического порядка посредством рождения определенных топологических искажений кристаллической структуры, известных кристаллографам под названием *дислокаций*. Свободная энергия дислокаций в точке перехода обращается в ноль, энергетический барьер, препятствующий их рождению, исчезает, расположе-

ние атомов становится хаотическим, и модуль сдвига обращается в ноль.

Сказанное о двумерных кристаллах верно и для двумерных сверхпроводящих и сверхтекучих систем. Если в трехмерном случае состояние сверхтекучей жидкости описывается комплексной волновой функцией конденсата  $\Psi = |\Psi|e^{i\phi}$ , то в сверхтекучих пленках понятие фазы  $\phi$  в данной точке жидкости теряет смысл — из-за тепловых флуктуаций ее отклонения от любого фиксированного значения велики, что и означает отсутствие дальнего порядка. Однако разность фаз в двух точках (разность двух больших чисел) мала и достаточно медленно возрастает с расстоянием между этими точками. Дальнего порядка нет, но ниже определенной температуры возникает так называемый *топологический дальний порядок*, связанный с тем, что изменение фазы волновой функции при обходе по любому замкнутому контуру в плоскости пленки квантуется, т.е. оказывается равным  $2\pi N$ , где  $N$  целое число. Возбужденные состояния жидкости, при обходе которых имеется такой набег фазы, носят название *квантованных вихрей* — аналога дислокаций в двумерных кристаллах. Как и в обычной трехмерной сверхтекучей жидкости, в пленках имеется сверхтекучая, т.е. способная к бездиссипативному течению, компонента с плотностью  $\rho_s$  — аналогом модуля сдвига в двумерных кристаллах. В отличие от трехмерного случая сверхтекучесть в пленках возникает скачком, причем величина скачка сверхтекучей плотности связана с температурой перехода  $T_c$  универсальным соотношением

$$\Delta\rho_s = 2m^2T_c/\pi\hbar^2$$

(где  $m$  — масса атома,  $\hbar$  — постоянная Планка), выполнение которого соответствует обращению в ноль свободной энергии квантованных вихрей, что и разрушает топологический дальний порядок. Это соотношение проверено экспериментально в пленках гелия-4 [3].

За год до появления работ Костерлица и Таулесса ряд основополагающих результатов, касающихся специфического низкотемпературного упорядочения в двумерных системах, был получен в работах нашего безвременно ушедшего соотечественника Вадима Березинского [4, 5]. Именно он указал на существование низкотемпературной фазы в пленках жидкого гелия, обладающей конечной плотностью сверхтекучей компоненты. Идеи Вадима активно обсуждались в Институте Ландау с участием Анатолия Ларкина, Валерия Покровского и Александра Полякова (ныне профессора Принстонского университета), который впоследствии показал [6], что степенные или алгебраические корреляции, изучавшиеся Березинским в планарных двумерных системах, скажем, в магнетиках со спинами, лежащими в плоскости, не имеют места в двумерных магнетиках со спинами, принимающими произвольное пространственное направ-

ление. Это связано с появлением так называемых *скирмионных топологических возмущений*. Эти же возмущения, как было впервые замечено другим нобелевским лауреатом 2016 г. Дунканом Холдейном [7], служат источником щели в спектре возмущений в одномерных цепочках целочисленных спинов с антиферромагнитным взаимодействием, заставляющим соседние спины принимать противоположную ориентацию. Хотя, начиная с первых работ, Костерлиц и Таулесс ссылались на работы Березинского, но, как это часто бывает, другие западные авторы замалчивали приоритет Вадима. Однако постепенно все стало на свои места, и нынче в физической литературе общепринято название *фазовый переход Березинского—Костерлица—Таулесса*, или просто *БКТ-переход* (см. книгу «40 Years of Berezinskii—Kosterlitz—Thouless Theory» (World Scientific, 2013)). Многие результаты Березинского изложены в его диссертации «Низкотемпературные свойства двумерных систем с непрерывной группой симметрии», опубликованной с подачи его коллег и друзей в виде книги издательством «Физматлит» в 2007 г.

Топологические методы нашли применение и в физике совершенно другого явления — квантового эффекта Холла. Напомним, что эффектом Холла называется появление падения напряжения в проводнике, который находится в поперечном току магнитном поле, в направлении, перпендикулярном движению тока и магнитному полю. За экспериментальное открытие квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе при низких температурах, где холловская проводимость принимает в широких интервалах магнитного поля постоянные значения — *плато*, являющиеся с удивительной точностью целыми кратными величины  $e^2/2\pi\hbar$ , Клаус фон Клитцинг в 1985 г. был удостоен Нобелевской премии.

Квантово-механическая задача о движении не взаимодействующих электронов в магнитном поле  $H$  была решена Ландау, который показал, что их энергия квантуется:  $E_n = (e\hbar H/mc)(n + 1/2)$ , где  $e$  — заряд электрона, а  $c$  — скорость света, и каждый уровень энергии сильно вырожден, т.е. одному и тому же уровню соответствует много электронных состояний. Этих состояний на каждом уровне Ландау ровно столько, сколько квантов магнитного потока  $\Phi_0 = 2\pi\hbar c/e$  приходится на единицу площади, перпендикулярной магнитному полю.

Квантовый эффект Холла наблюдается в двумерных системах электронов в хаотическом потенциале, медленно меняющемся в пространстве. Электроны, находящиеся в состоянии с энергией выше последнего заполненного уровня Ландау, не вносят никакого вклада в холловскую проводимость. В области полей, соответствующих данному плато, продольное сопротивление равно нулю, как будто система обладает свойством сверхтекучести! На деле в этом интервале магнитных полей все состояния внутри слоя, содержащего электроны, локализова-



ны, а по краям текут токи, в равновесии подобные бездиссипативным внутримолекулярным токам.

В 1982 г. в работе Дэвида Таулесса, Махито Комото, Питера Найтингейла и Марселя ден Нийса [8] было установлено интересное соответствие между топологическими концепциями и квантованием холловской проводимости в двумерном электронном газе. Упомянутое выше вырождение состояний, соответствующих данному уровню Ландау, математически описывается как вырождение по квазиимпульсу в решетке магнитных трансляций — воображаемой кристаллической решетке, на каждую ячейку которой приходится один квант магнитного потока.

В работе 1982 г. было показано, что холловская проводимость в двумерном электронном газе в перпендикулярном плоскости магнитном поле принимает квантованные значения  $\sigma_H = Ne^2/2\pi h$ , где целое число  $N$  есть число полностью заполненных уровней Ландау. Иначе говоря, на каждый заполненный уровень Ландау приходится по одному кванту холловской проводимости  $N = 1 + 1 + 1 + \dots$ . Каждая из единиц в этой сумме — это номер так называемого *класса Черна* — степени отображения\* элементарной ячейки (ячейки Бриллюэна) обратного пространства (пространства волновых векторов) в решетке магнитных трансляций на область изменения нормализованной комплексной блоховской функции электронов в этом кристалле. В то же время при полном обходе ячейки Бриллюэна вдоль ее границы фаза блоховской волновой функции (*фаза Берри*) изменяется на  $2\pi$ . Состояниям, соответствующим незаполненному уровню Ландау, отвечает обход по контуру, проходящему внутри ячейки Бриллюэна, дающий нулевой набег фазы. Этот важный математический факт объясняет явление целочисленного квантового эффекта Холла, который наблюдается в двумерных системах электронов в хаотическом потенциале, медленно меняющемся в пространстве. Число  $N$ , фиксирующее плато в холловской проводимости в широком интервале магнитных полей, суть число уровней Ландау, расположенных ниже химического потенциала, который служит границей между заполненными и незаполненными состояниями при нулевой температуре. Таким образом, электроны, находящиеся в состояниях с энергией выше последнего заполненного уровня, не вносят никакого вклада в холловскую проводимость. О квантовом эффекте Холла и других применениях топологии в физике можно прочесть в книге Дэвида Таулесса «Topological Quantum numbers in Nonrelativistic Physics» (World Scientific, 1998), содержащей также статьи других авторов на эту тему.

\* Отображение — соответствие по определенному правилу между точками двух геометрических фигур. Отображение обобщает понятие функции. Как и многозначная функция, отображение может быть многократным. Кратность отображения характеризуется целым числом — степенью отображения.

Важное следствие работы четырех авторов — возможность появления плато в холловской проводимости без внешнего магнитного поля в системах с уровнем Ферми, лежащим внутри энергетической щели. Такая ситуация реализуется в модели из двух подрешеток с комплексным интегралом перескока электронов между атомами в каждой из них, которую впервые изучил Холдейн в 1988 г. [9], а три года назад удалось реализовать экспериментально [10].

Как уже было упомянуто, в 1983 г. Холдейн предложил [7] континуальное описание для дискретных одномерных спиновых цепочек с целочисленным спином при антиферромагнитном взаимодействии между спинами (такого рода объекты встречаются среди сильно анизотропных органических соединений). Утверждение Холдейна, основанное на работе Полякова [6], состояло в том, что возбужденные состояния, которые возникают в результате специфического пространственно-временного отклонения спинов цепочки от равновесного направления, получивших название *инстантонов*, отделены от основного состояния системы энергетической щелью (*щелью Холдейна*). Что и отличает спектры возбуждений цепочек с целочисленным спином от бесщелевых спектров цепочек с полужелым спином, найденных еще в довоенные годы Хансом Бете (лауреатом Нобелевской премии 1967 г. за теорию ядерного синтеза в звездах). Любопытно, что термин *гипотеза Холдейна* употребляли зачастую те, кто не верил в такое различие спектров. Сейчас это проверенный экспериментально и твердо установленный теоретически факт.

Оставляя за кадром математику, можно описать происходящее следующим образом. Основное состояние цепочки антиферромагнитно, т.е. направление любых двух соседних спинов противоположно, что соответствует минимуму энергии взаимодействия спинов между собой. Можно сказать, спины строго чередуются в последовательности: ...вверх, вниз, вверх, вниз... Проскальзывание инстантона переворачивает один из спинов в конфигурацию, параллельную соседям: ...вверх, вниз, вверх, вверх, вверх, вниз, вверх... Возникает проигрыш в энергии взаимодействия — это и есть щель  $E$ , отделяющая возбужденное состояние от основного. Ее можно измерить посредством неупругого рассеяния нейтронов на веществах, содержащих одномерные или квази-одномерные спиновые цепочки.

Возбужденное состояние с перевернутым спином обладает избыточным по отношению к основному состоянию магнитным моментом, взаимодействующим с магнитным полем  $H$  по закону  $-MH$ , где  $M$  — проекция магнитного момента на направление поля. Согласно квантовой механике, проекция спина, равного единице (спин, как и орбитальный момент, измеряется в квантах действия, т.е. в постоянных Планка), на направление поля

может принимать только три значения, равные  $+1$ ,  $-1$ ,  $0$ . Таким образом, во внешнем поле уровень энергии возбужденного состояния расщепляется на три уровня с энергиями:  $E$ ,  $E + MH$  и  $E - MH$ . Расщепление энергии возбуждений в магнитном поле также измерено экспериментально.

Увеличивая поле, можно обнулить энергию одного из типов возбужденных состояний ( $E - MH = 0$ ). В таком поле возбуждения с нулевой энергией будут рождаться самопроизвольно. Возникнет

макроскопически большое количество таких возбуждений в одном и том же квантовом состоянии. Это явление принято называть бозе-эйнштейновской конденсацией магнонов. Но это уже другая история, не имеющая прямого отношения к теме нашего рассказа.

© **В.П.Минеев**,

доктор физико-математических наук  
Институт теоретической физики имени Л.Д.Ландау  
г.Черноголовка (Московская обл.)

## Литература

1. *Kosterlitz J.M., Thouless D.J.* Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids (Application of dislocation theory) // *J. of Phys. C: Solid State Physics*. 1972. V.5. P.124–126.
2. *Kosterlitz J.M., Thouless D.J.* Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems // *J. of Phys. C: Solid State Physics*. 1973. V.6. P.1181–1203.
3. *Bishop D.J., Reppy J.D.* Study of the superfluid transition in twodimensional  $^4\text{He}$  films // *Phys. Rev. Lett.* 1978. V.40. P.1727–1730.
4. *Березинский В.Л.* Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии. I. Классические системы // *ЖЭТФ*. 1970. Т.59. Вып.3. С.907–920 (*Sov. Phys. JETP*. 1971. V.32(3). P.493–500).
5. *Березинский В.Л.* Разрушение дальнего порядка в одномерных и двумерных системах с непрерывной группой симметрии. II. Квантовые системы // *ЖЭТФ*. 1971. Т.61. Вып.3. С.1144–1156 (*Sov. Phys. JETP*. 1972. V.34(3). P.610–616).
6. *Polyakov A.M.* Interaction of Goldstone particles in two dimensions, applications to ferromagnets and massive Yang-Mills fields // *Physics Letters B*. 1975. V.59. P.79–81.
7. *Haldane F.D.M.* Nonlinear field theory of large-spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the one-dimensional easy-axis-Neel State // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V.50. P.1153–1156.
8. *Thouless D.L., Kohmoto M., Nightingale M.P., Den Nijs M.* Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V.49. P.405–408.
9. *Haldane F.D.M.* Model for a quantum Hall effect without Landau levels: condensed-matter realization of the «parity anomaly» // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V.61. P.2015–218.
10. *Chang C.Z., Zhang J., Feng X. et al.* Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator // *Science*. 2013. V.340. P.167–170.

## По химии — Ж.-П.Соваж, Ф.Стoddарт, Б.Феринга

**Н**обелевская премия по химии 2016 г. присуждена профессорам Жан-Пьеру Соважу (Jean-Pierre Sauvage, Университет Страсбурга, Франция), Джеймсу Фрезеру Стоддарту (James Fraser Stoddart, Северо-Западный университет, Эванстон, США) и Бернарду Лукасу Феринге (Bernard Lukas Feringa, Университет Гронингена, Нидерланды) «за дизайн и синтез молекулярных машин».

Ж.-П.Соваж родился в 1944 г. в Париже, изучал химию в Университете Луи Пастера (Страсбург), где в 1971 г. успешно защитил диссертацию под руководством Жан-Мари Лена. Затем получил позицию исследователя CNRS (Национального центра научных исследований Франции) и в 1973–1974 гг.

стажировался в Оксфорде у Малькома Грина. В 1980 г. организовал Лабораторию неорганической химии (Laboratoire de Chimie Organo-Minérale, Страсбургский университет), директором которой был до 2009 г. С тех пор Соваж — почетный профессор Страсбургского университета, почетный директор CNRS. Член-корреспондент Академии наук Франции с 1990 г., действительный член Академии наук Франции с 1997 г., иностранный член РАН с 2016 г. Научные интересы Соважа включают молекулярные машины и механически сцепленные молекулы (mechanically interlocked molecules), в том числе катенаны, ротаксаны и узлы. Первым получил узел-трилистник [1] и молекулярный мускул [2].





Жан-Пьер Соваж.



Джеймс Фрезер Стоддарт.



Бернард Феринга.

Сэр Дж.Ф.Стоддарт родился в 1942 г. в Эдинбурге, учился в Университете Эдинбурга, там же в 1966 г. получил докторскую степень. Затем в 1967–1970 гг. стажировался в Канаде под руководством Джона Джоунса. В 1970 г. стал сотрудником Университета Шеффилда, в 1978–1981 гг. работал в фармацевтической компании ICI. В 1990 г. занял позицию профессора органической химии в Университете Бирмингема, а в 1997 г. переехал в США — работать в Калифорнийском университете. В 2008 г. переехал в Северо-Западный университет, где сейчас является профессором и директором Центра химии интегрированных систем. Член Американской академии искусств и наук (2012) и Национальной академии наук (2014), почетный член Королевского общества Эдинбурга (2008) и Королевского химического общества (2011). В 2007 г. королева Великобритании Елизавета II пожаловала Стоддарту титул рыцаря-бакалавра за заслуги в области химии. Его научные интересы связаны с темплатным синтезом, молекулярным распознаванием, процессами самосборки и широким кругом вопросов по химии механически сцепленных молекул.

Б.Л.Феринга родился в 1951 г. в Баргер-Компасскуме (Нидерланды), учился в Университете Гронингена и в 1978 г. защитил диссертацию под руководством Ханса Винберга. Вернулся в университет в 1982 г. после работы в компании «Шелл», занял позицию профессора в 2003 г. Член Европейской академии (2010) и Нидерландской королевской академии наук (2006), иностранный член Американской академии искусств и наук (2004). Занимается, помимо основного направления в области молекулярных моторов, еще и фотофармакологией, а также стереохимией и гомогенным катализом.

Что такое *молекулярные машины*? Для ответа на этот вопрос нужно сначала напомнить, что та-

кое *молекулярные устройства*. По определению нобелевского лауреата 1987 г. Жан-Мари Лена, это «структурно организованные и функционально интегрированные химические системы» [3]. В свою очередь, *молекулярная машина* — это «устройство, в котором реализация функции происходит в результате механического перемещения компонентов относительно друг друга». В ряде случаев могут применяться термины *супрамолекулярное устройство* и *супрамолекулярная машина*, так как реализация функций на молекулярном уровне почти обязательно затрагивает взаимодействие двух или более молекул.

Почему *почти*? Потому что для реализации идеи молекулярной машины можно использовать один из трех общих подходов, в число которых входит и «одномолекулярный» вариант. Эти подходы предполагают осуществлять:

- перемещение одной молекулы относительно другой, связанной с первой *топологической* (или *механической*) *связью*; последнее означает, что два или более компонента общей надмолекулярной системы не связаны между собой ковалентной связью, но их разделение обязательно должно сопровождаться разрывом ковалентной связи хотя бы в одном компоненте (здесь также уместно упомянуть эндодрические комплексы фуллеренов или «горошины» фуллеренов внутри «стручков» — углеродных нанотрубок);

- перемещение фрагмента одной и той же молекулы относительно неподвижной центральной части;

- перемещение молекулы по отношению к какому-либо внешнему объекту за счет реализации первого или второго подходов.

Работы Соважа и Стоддарта связаны с реализацией первого подхода, а именно с синтезом и исследованием перемещений относительно друг друга механически сцепленных молекул (рис.1).

Таких супрамолекулярных объектов существует три типа: катенаны, ротаксаны и узлы.

Несмотря на то что первые, так называемые *статистические* (когда выход продукта оказывался очень мал), синтезы катенанов и ротаксанов были выполнены еще в 1960-х годах, направленное получение и систематическое исследование таких объектов (рис.2) было предпринято только в начале 1980-х [4]. Оба лауреата, Соваж и Стоддарт, высказали предположение, что катенаны и ротаксаны могут выполнять функции молекулярных машин, если научиться управлять вращением одного цикла (катенаны, Соваж, рис.3) или перемещением цикла по оси (ротаксаны, Стоддарт, рис.4). Подобные механические перемещения могут управляться внешним воздействием, таким как электрический ток, химические агенты или свет.

Выдающимся развитием нового подхода стала демонстрация принципиальной работы «химического мускула» [2] (рис.5). В данном случае мы имеем дело с обратимым перемещением одной молекулы вдоль другой, как это происходит в ре-

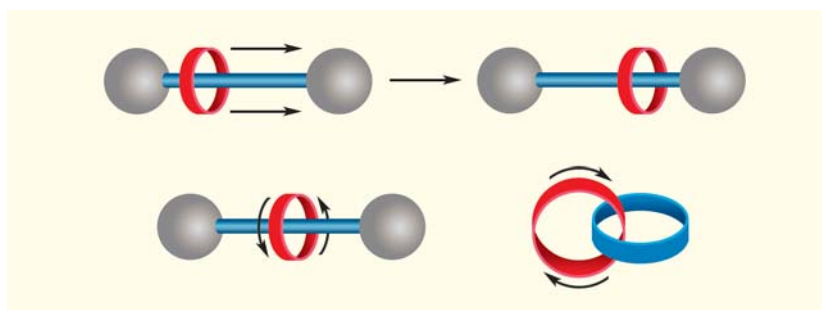


Рис.1. Принцип работы молекулярных моторов на основе ротаксанов и катенанов.

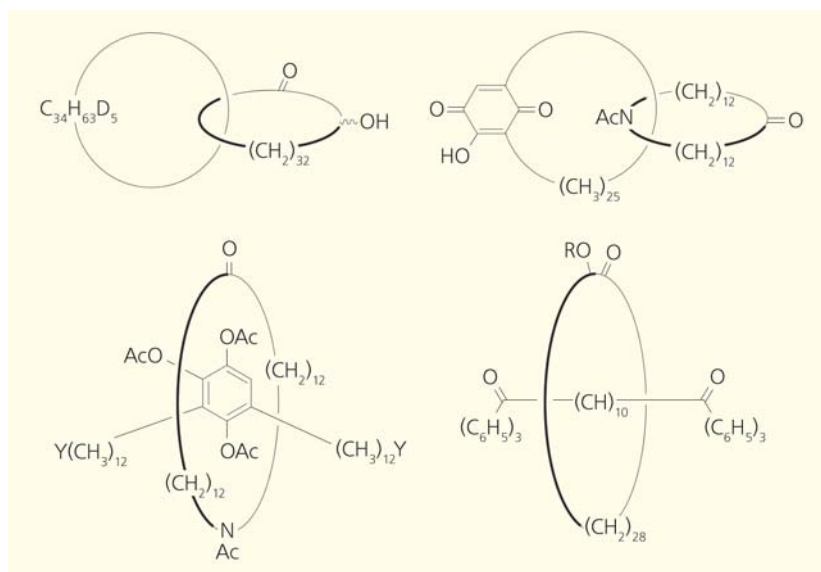


Рис.2. Примеры катенанов и ротаксанов (Ac — ацетил; R, Y — заместители).

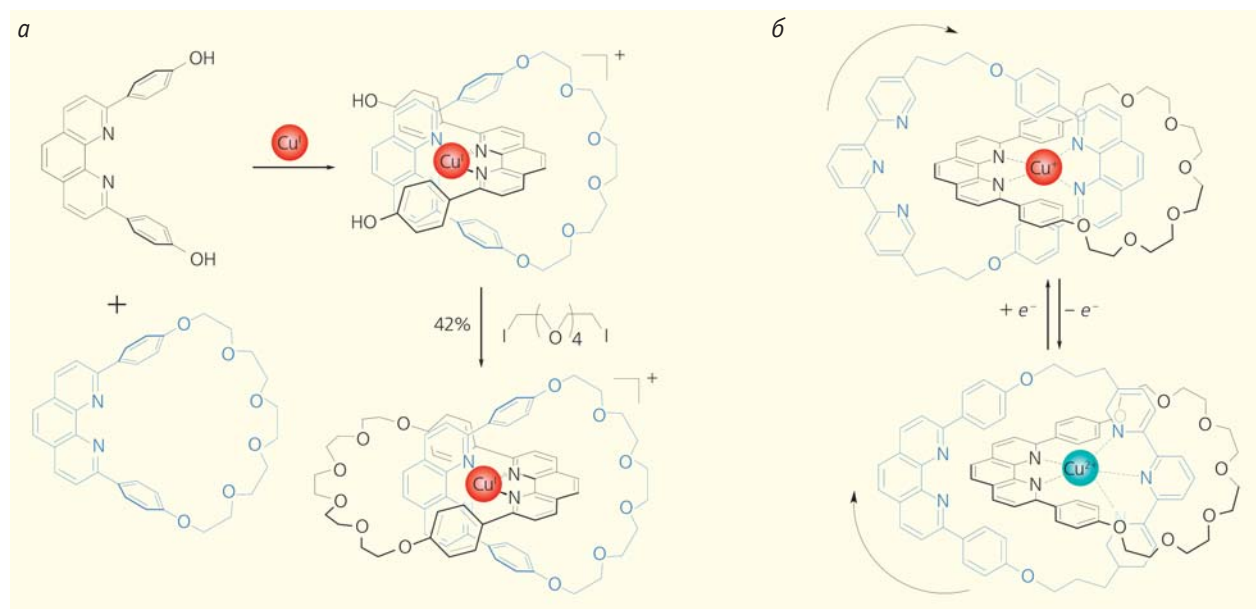


Рис.3. Темплатированный медью синтез катенана [5] (а) и вращение одного цикла вокруг другого под действием окисления/восстановления иона меди (б).



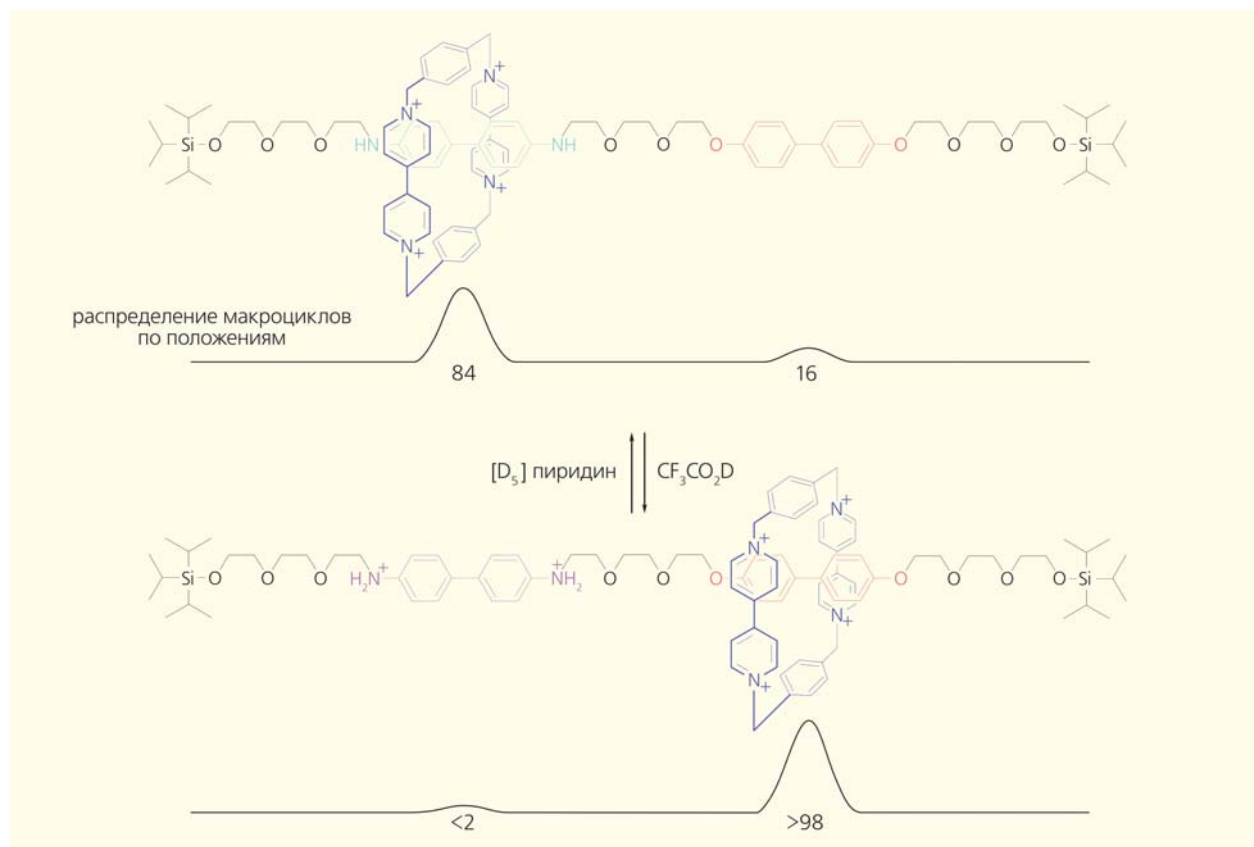


Рис.4. Передвижение положительно заряженного цикла по оси ротаксана под действием кислоты или основания [6]; первая работа [7].

альных живых системах при сокращении мышц; при этом обе молекулы связаны друг с другом топологической связью.

Группа Стоддарта продемонстрировала возможность перемещения циклической молекулы вдоль молекулы-оси в случае ротаксанов. В этом случае расположение молекулы-цикла в определенном месте оси диктовалось максимальным межмолекулярным притяжением между ними — изменяя степень такого взаимодействия путем внешних воздействий, можно было «заставить»

молекулу-цикл перемещаться в место наибольшего по энергии взаимодействия. Также было экспериментально показана возможность существования и функционирования «молекулярного лифта» — устройства, размещенного на поверхности и способного перемещать вверх-вниз «кабину лифта» — молекулу, состоящую из трех краун-эфиров, соединенных центральной частью (рис.6) [8].

Работы Феринги связаны с реализацией второго подхода — направленного вращения одной из частей молекулы под действием света. В качестве базового фрагмента он использовал двойную связь, для которой характерно протекание *транс-цис*-изомеризации под действием света путем вращения вокруг формально ординарной связи, образующейся в возбужденном состоянии. Принципиальным отличием подхода Феринги стал выбор заместителей у обоих атомов углерода двойной связи — введение асимметрических атомов углерода позволило направлять вращение только в одну сторону (рис.7). Если правильным образом расположить сконстру-

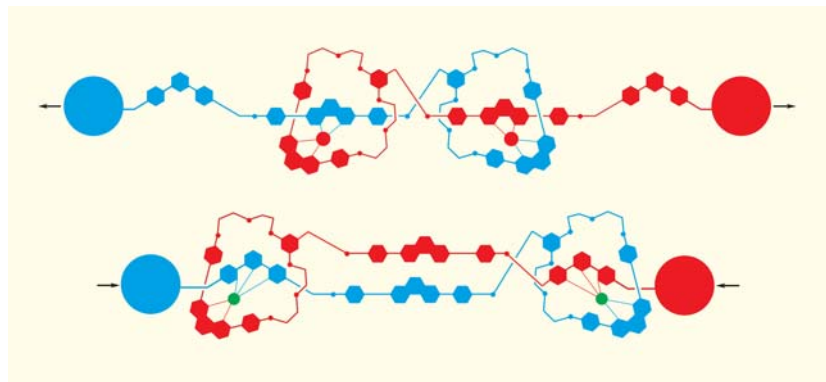


Рис.5. Принцип работы «химического мускула».

ированный молекулярный объект на поверхности, такое вращение может привести к механическому его перемещению.

Одним из выдающихся достижений группы Феринги стала демонстрация в 2006 г. выполнения механической работы всего одной молекулой [10]. Принцип действия такой молекулы-мотора показан на рис.8.

В результате реализации всех трех подходов перед исследователями открылись возможности создания молекулярных переключателей, сенсоров, насосов, машин, лифтов, переносчиков лекарств и т.д. Это исключительно важное достижение, так как принцип работы мышц основан на межмолекулярном перемещении под действием ионов или изменения кислотности [11]. Нельзя не упомянуть в связи с этим и так называемый *motor protein* кинезин, и АТФ-синтазу.

Значительный вклад в развитие данной проблемы и в изучение молекулярных машин внесли отечественные ученые. Одним из пионеров был академик РАН, профессор М.В.Алфимов, работы которого по супрамолекулярной фотонике продолжают под руководством члена-корреспондента РАН, профессора С.П.Громова в Центре фотохимии РАН [12] совместно с лабораторией супрамолекулярной химии и нанотехнологии органических материалов химического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Нельзя не отметить вклад школы академика РАН, профессора А.Ю.Цивадзе, который вместе с членом-корреспондентом РАН, профессором Ю.Г.Горбуновой руководит выполнением двух международных проектов по созданию молекулярных машин. Один проект напрямую связан с лабораторией Ж.-П.Соважа и посвящен синтезу и исследованию краун-эфирзамещенных фталоцианинов и их комплексов с медью [13]. Второй касается синтеза и исследования *молекулярных турникетов* — соединений, в которых можно затормозить (или запустить) вращение одного фрагмента относительно другого путем внешнего воздействия [14].

Идея молекулярных машин получила необычное развитие в работах японского химика С.Шинкаи и затем стала широко использоваться в других коллективах, изучающих феномен и области применения *супрамолекулярных гелей* [15]. Оказалось, что небольшое изменение в геометрии одной молекулы под действием добавления/удаления всего лишь одного (!) электрона приводит к драматическому изменению макроскопических свойств системы — она может обратимо переходить из состояния геля в состояние раствора [16].

Имеет смысл упомянуть еще одно интересное и перспективное направление применения принципов молекулярных машин — конструирование ротаксанов внутри так называемых «металл-органических каркасов» (МОК, в англоязычной литературе они обозначаются как MOF) [17].

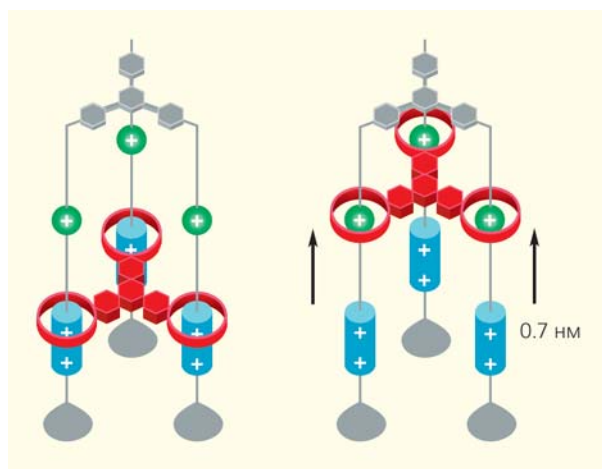


Рис.6. Принцип работы «молекулярного лифта» на основе изменения pH среды.

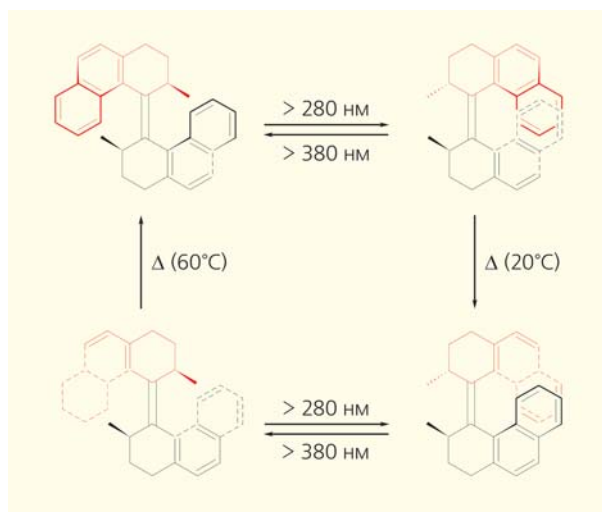


Рис.7. Направленное вращение вокруг двойной углерод-углеродной связи [9].

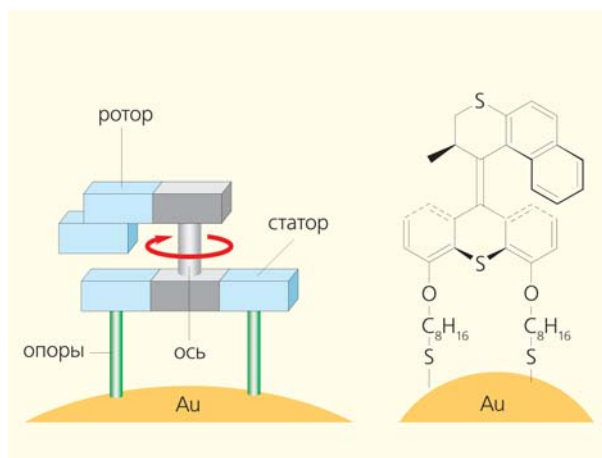


Рис.8. Закрепленные на поверхности золота молекулярные моторы, способные вращать макрообъекты.

Важно отметить, что исследование молекулярных устройств соответствует одному из направлений критических технологий РФ, определенных правительственным постановлением, а именно «созданию механизмов и машин для генерации, преобразования и передачи энергии и движения на наноуровнях, для создания наноинструментов для контроля, диагностики нанокolicеств материалов и веществ».

Присуждение Нобелевской премии по химии 2016 г. не только отражает выдающийся вклад лауреатов в понимание Природы, но и служит вдохновляющим стимулом для всех, кто работает в области супрамолекулярной химии и нанотехнологии органических материалов. Как сказал в заключительном абзаце своего короткого сообщения Дэвид Лейх, «it is a Nobel Prize given for

tremendous scientific creativity, inspirational science, science that makes you dream “what if”», что в переводе означает: «Эта Нобелевская премия дана за исключительную научную изобретательность, за возбуждающую науку, за науку, которая побуждает вас мечтать: а что будет, если...» [4]. Тем читателям, кто захочет подробнее познакомиться с темой, можно посоветовать книгу [18]. А самая свежая информация собрана в специальном номере журнала ChemPhysChem, целиком посвященном молекулярным машинам: Special Issue: Molecular Machines. 2016. June 17. V.17. Iss.12. P.1710–1938.

© С.З.Вацадзе,

доктор химических наук

Московский государственный университет

имени М.В.Ломоносова

## Литература

1. Dietrich-Buchecker C.O., Sauvage J.-P. A synthetic molecular trefoil knot // *Angew. Chem. Int. Ed.* 1989. V.28. P.189–192.
2. Jiménez M.C., Dietrich-Buchecker C., Sauvage J.-P. Towards synthetic molecular muscles: contraction and stretching of a linear rotaxane dimer // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2000. V.39. Iss.18. P.3284–3287.
3. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы / Пер. с англ. под ред. В.В.Власова, А.А.Варнека. Новосибирск, 1998. Гл.8.
4. Leigh D.A. Genesis of the nanomachines: the 2016 Nobel prize in chemistry // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016. V.55. Doi:10.1002/anie.201609841.
5. Dietrich-Buchecker C.O., Sauvage J.-P., Kintzinger J.P. Une nouvelle famille de moléculaires: les métallo-caténanes // *Tetrahedron Lett.* 1983. V.24. P.5095–5098.
6. Bissell R.A., Cordova E., Kaifer A.E., Stoddart J.F. A chemically and electrochemically switchable molecular shuttle // *Nature*. 1994. V.369. P.133–137.
7. Ashton P.R., Goodnow T.T., Kaifer A.E. et al. A [2]catenane made to order // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1989. V.28. P.1396–1399.
8. Badjić J.D., Balzani V., Credi A. et al. A molecular elevator // *Science*. 2004. V.303. Iss.5665. P.1845–1849.
9. Koumura N., Zijlstra R.W.J., Delden R.A. et al. Light-driven monodirectional molecular rotor // *Nature*. 1999. V.401. P.152–155.
10. Eelkema R., Pollard M.M., Feringa B.L. et al. Molecular machines: nanomotor rotates microscale objects // *Nature*. 2006. V.440. Iss.7081. P.163.
11. Kolomeisky A. Molecular proteins and molecular motors. Boca Raton, London, New York, 2015.
12. Громов С.П. Фотоактивные супрамолекулярные устройства и машины // *Природа*. 2015. №12. С.3–9.
13. Martynov A.G., Gorbunova Yu.G., Nefedov S.E. et al. Synthesis and copper(I)-driven disaggregation of a zinc-complexed phthalocyanine bearing four lateral coordinating rings // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2012. P.6888–6894.
14. Meshkov I.N., Bulach V., Gorbunova Yu.G. et al. Phosphorus(V) porphyrin-based molecular turnstiles // *Inorg. Chem.* 2016. V.55. P.10774–10782.
15. Анаников В.П., Хемчян Л.Л., Иванова Ю.В. и др. Развитие методологии современного селективного органического синтеза: получение функционализированных молекул с атомарной точностью // *Успехи химии*. 2014. Т.83. Вып.10. С.885–985.
16. Kawano S.-I., Fujita N., Shinkai S. A coordination gelator that shows a reversible chromatic change and sol-gel phase-transition behavior upon oxidative/reductive stimuli // *J. Am. Chem. Soc.* 2004. V.126. P.8592–8593.
17. Coskun A., Hmadeb M., Barin G. et al. Metal-organic frameworks incorporating copper-complexed rotaxanes // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2012. V.51. P.2160–2163.
18. Студ Дж.В., Этвуд Дж.Л. Супрамолекулярная химия. Т.2 / Пер. с англ. под ред. А.Ю.Цивадзе, В.В.Арсланова, А.Д.Гарновского, М., 2007. Гл.8.



## По физиологии или медицине — Ё.Осуми

**Н**обелевская премия по физиологии или медицине в 2016 г. была присуждена профессору Токийского технологического институт Ёсинори Осуми «за исследования механизмов аутофагии».

Ёсинори Осуми (Yoshinori Ohsumi) родился 9 февраля 1945 г. в Фукуока — крупном портовом городе на юго-западе Японии. В 1967 г. окончил Токийский университет, где в 1974 г. получил степень доктора философии. После трех лет (1974–1977) постдокторантуры в Рокфеллеровском университете (Нью-Йорк, США) Осуми вернулся в Токийский университет, где сначала был научным сотрудником, затем начал преподавать, в 1988 г. был назначен ассоциированным профессором. С 1996 г. в той же должности он работал в Национальном институте фундаментальной биологии (Окадзаки-Сити, центральная Япония), с 2004 г. — в Университете передовых исследований (Хаяма, префектура Канагава), с 2009 г. — в Токийском технологическом институте. После выхода на пенсию в 2014 г. профессор Осуми продолжает работать и в настоящее время возглавляет лабораторию клеточной биологии\* в Институте инновационных исследований Токийского технологического института. Осуми — автор более 300 публикаций, которые цитировались 36 390 (!) раз (база данных Web of Science). Он награжден премиями Фудзихары (2005), Японской академии наук (2006), Ботанического общества Японии (2007), Асахи (2008), Киото (2012). Заслуги Осуми были особенно отмечены в последние два года: в 2015 г. за выдающиеся результаты в фундаментальных исследованиях он был награжден Международной премией Гайрднера, Международной премией по биологии, которую ежегодно вручает император Японии, премией Розенстила и получил звание заслуженного деятеля культуры (Япония); в 2016-м стал лауреатом премий Уайли и Поля Джанссена, а главное — 23-м японцем, получившим Нобелевскую премию.

Японский ученый удостоен премии за фундаментальные работы, объяснившие миру, как происходит аутофагия (от греч. *αὐτός* — сам и *φαγεῖν* — есть) — ключевой процесс поддержания гомеостаза клеток и тканей за счет разрушения и реутилизации клеточных компонентов. «Открытия Осуми привели к формированию новой парадигмы в понимании того, как клетки уничтожают дефектные компоненты. Его исследования открыли путь к осознанию важности аутофагии во многих физиологических процессах, таких как адаптация к голоданию и реакция на ин-



Ёсинори Осуми.

фекцию», — говорится в пресс-релизе Нобелевского комитета. Научная заслуга Осуми состоит в изучении молекулярных механизмов процесса, при котором внутренние компоненты клетки доставляются внутрь лизосом (у млекопитающих) или вакуолей (клетки дрожжей) и подвергаются в них деградации.

Процессы аутофагии у дрожжей и млекопитающих имеют много общего. Макроаутофагия — эволюционно консервативный процесс. Происходит он в уникальных органеллах — аутофагосомах, в которых изолируется часть цитоплазматического материала. Наружная мембрана аутофагосом затем сливается с лизосомами, что позволяет лизосомальным ферментам деградировать захваченный цитоплазматический материал в аутофаголизосомах. Специализированные типы макроаутофагии направлены на утилизацию органелл, таких как митохондрии (митофагия), а также внутриклеточных бактерий (ксенофагия). При так называемой шаперон-опосредованной аутофагии деградация цитоплазматического субстрата протекает иначе: он опознается шаперонным белком Hsc70 и направляется через мембрану внутрь лизосом. Микроаутофагия происходит путем инвагинации самой лизосомной мембраны для помещения материала, подлежащего деградации, внутрь лизосомы.

\* [www.ohsumilab.ari.titech.ac.jp/english.html](http://www.ohsumilab.ari.titech.ac.jp/english.html)

Очевидно, что определенный уровень аутофагии должен существовать в норме, и нарушение его, как становится ясно сейчас, может быть причиной различного рода патологий, а также старения. Оказалось, что аутофагическая машина исключительно чувствительна к различного рода воздействиям, включая внешнюю среду. Именно это обстоятельство позволяет клеткам преодолевать стрессы путем включения активного процесса адаптивной аутофагии. Однако в случае тяжелых повреждений аутофагия может играть противоположную роль — участвовать в регуляции процессов программированной клеточной гибели.

Существование структур, содержащих протеолитические ферменты для переваривания белков, обнаружил еще в начале 50-х годов бельгийский цитолог и биохимик К. де Дюв. Он исследовал ультраструктуру клеток печени под электронным микроскопом и идентифицировал новые органеллы, назвав их лизосомами (от греч. *λυσις* — растворять и *σωμα* — тело). За это открытие и последующие работы в области структурной и функциональной организации клетки Дюв (вместе с А.Клодом и Дж.Паладе) в 1974 г. получил Нобелевскую премию по физиологии или медицине.

Дюв продолжил исследования и обнаружил в клетках различного происхождения особые мембранные структуры, которые включают цитоплазматические компоненты и даже митохондрии. Учитывая, что эти структуры способны переваривать содержимое, ученый в 1963 г. назвал явление аутофагией. Результаты исследования получили подтверждение при изучении разных клеток млекопитающих, а также жизненных циклов одноклеточных организмов — амёбы *Amoeba proteus*, водоросли *Euglena gracilis* и инфузории *Tetrahymena pyriformis*. Однако механизмы аутофагии оставались неизвестными на протяжении более 30 лет.

Сначала предполагали, что аутофагия помогает справиться с метаболическим стрессом при голодании и играет определенную роль в патогенезе заболеваний. В одной из ранних работ с применением различных методов анализа удалось наблюдать образование фагофор — структур с двойной мембраной, которая окружала участок цитоплазмы и замыкала его в специальную везикулу, не содержащую гидролитических ферментов, — т.е. собственно в аутофагосому.

Сейчас известно, что стадия формирования аутофагосомы очень скоротечна (10–20 мин). Слияние ее с лизосомой приводит к образованию аутофаголизосом, в которых и происходит деградация захваченного материала. Несмотря на накопленные знания, прогресс в изучении аутофагии тормозился из-за того, что не были известны гены, управляющие этим процессом, и сигнальные пути, контролируемые последовательные стадии аутофагии. Мало знали и о том, какие стадии проходит аутофагия и как осуществляется деградация компонентов клетки.

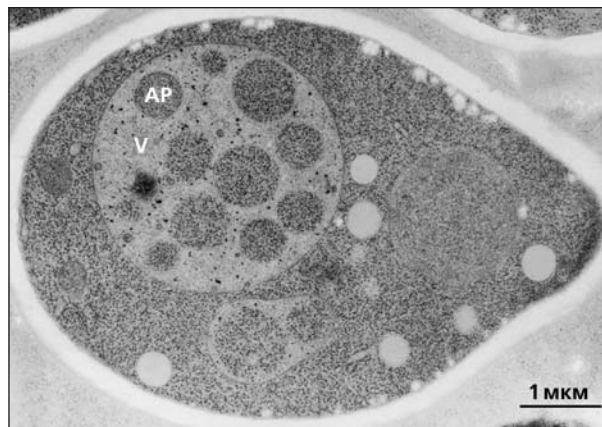
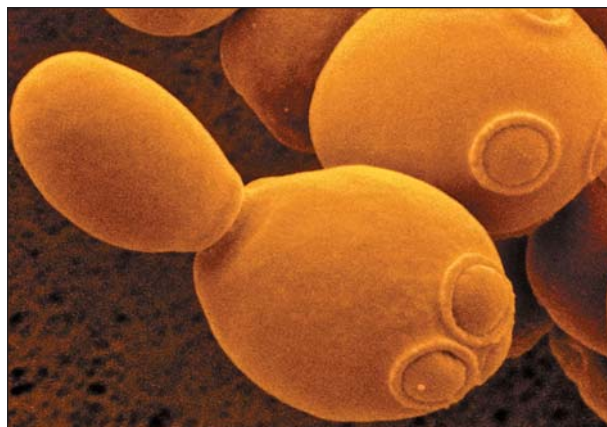
Справедливости ради замечу, что открытие лизосом сразу подтолкнуло ученых к поиску более избирательных механизмов деградации белков. Этому способствовало открытие протеасом\*. Еще в 1977 г. А.Голдберг доказал существование АТФ-зависимой системы деградации белка в ретикулоцитах, которые вообще лишены лизосом. Этот процесс происходит в протеасомах — безмембранных структурах, состоящих из нескольких крупных белковых субъединиц и обладающих протеолитической активностью. В эукариотических клетках протеасомы содержатся как в ядре, так и в цитоплазме. Основная их функция — протеолитическая деградация ненужных и поврежденных белков до коротких пептидов.

Оказалось, что подлежащий деградации белок распознается ферментами (убиквитинлигазами), которые катализируют реакции присоединения к его боковым аминокислотам одного или нескольких мономеров убиквитина (от англ. ubiquitous — вездесущий; этот небольшой, размером 8.5 кДа, белок, присутствующий почти во всех эукариотических клетках, был открыт еще в 1975 г. Г.Гольдштейном). Меченый убиквитином белок становится мишенью для протеасомы, попав в которую, расщепляется ее ферментами-протеазами на аминокислоты\*\*. Их клетка использует для построения других белков. Дело в том, что в день человеку нужно 200–300 г белка, а с пищей поступает только около 70 г. Остальное клетки получают, перерабатывая ненужные белки в протеасомах. Однако протеасомы, как оказалось, предназначены в основном для адресной деградации короткоживущих белков, и оставалось неясно, как клетка перерабатывает фрагменты, которые крупнее отдельных белковых молекул, и как она разрушает большие фрагменты цитоплазмы и органеллы. Эта брешь в знаниях была закрыта работами в основном Осуми и его многочисленных последователей.

В начале 1990-х годов доцент Токийского университета Ёсинори Осуми начал изучать процесс аутофагии, выбрав в качестве модели пекарские дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae*), поскольку у этого организма можно быстро получить мутации и анализировать фенотип мутантов [3]. В первую очередь ученого интересовало, используют ли дрожжи аутофагию для реутилизации компо-

\* Подробнее см.: *Абрамова Е.Б., Картов В.Л.* Протеасома: разрушение во имя созидания // *Природа*. 2003. №7. С.36–45.

\*\* Основной вклад в эти исследования внесли А.Хершко и А.Чехановер, а также И.Роуз (хотя Роуз впоследствии и приуменьшал свою роль в открытии). Все трое разделили Нобелевскую премию по химии в 2004 г. «за открытие опосредующей роли убиквитина в деградации белка». К сожалению, Нобелевский комитет обошел вниманием вклад нашего соотечественника А.Я.Варшавского, который в 1977 г. эмигрировал в США (ныне — профессор Калифорнийского технологического института). Он опубликовал к 1990-м годам ряд принципиальных работ по этой теме [1, 2].



Электронные микрофотографии дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* (слева; tangledwing.tumblr.com) и дрожжевой клетки с вакуолью (V), заполненной аутофагосомами (AP), в которых не происходит расщепления содержимого, — иллюстрация из пионерной работы Осуми [3]. В эксперименте он использовал мутантные клетки дрожжей, которые были лишены нескольких протеолитических ферментов. В результате стимуляции аутофагии (клетки поместили в бедную питательными веществами среду) в цитоплазме стали возникать аутофагосомы, и через три часа вакуоли дрожжей целиком ими заполнились. Образовавшиеся органеллы по составу и химической активности не отличались от окружающей их цитоплазмы, а это означало, что процесс аутофагии был приостановлен за счет недостатка протеолитических ферментов.

нентов клетки. Как известно, у дрожжей функцию лизосом клеток млекопитающих выполняет вакуоль. Чтобы проверить свою гипотезу, Осуми сконструировал дрожжевые штаммы, которые не имели вакуолярных протеаз, участвующих в аутофагии, — протеиназы А, протеиназы В и карбоксипептидазы. При переводе дрожжей на бедную питательную среду (голодание) он обнаружил, что вакуоли увеличивались и в отсутствие протеолитических ферментов в них накапливалось много непереваренного материала. Используя относительную простоту получения мутантов у дрожжей, Осуми идентифицировал мутации 15 генов, которые были связаны с аутофагией в голодающих клетках, и назвал генами аутофагии, *apg* (от англ. **autophagy**). Эта, можно сказать, историческая работа была опубликована в 1993 г. в FEBS Letters — журнале, к слову, с невысоким импакт-фактором и тогда и сейчас [4]. Впоследствии, когда аналогичные гены были открыты у млекопитающих, *apg* переименовали в гены, связанные с аутофагией, — *ATG* (от англ. autophagy-related genes), и такая номенклатура используется до сих пор. Сейчас известно более 30 генов *ATG*. Интересно, что *ATG1*, кодирующий серин-треониновую киназу у дрожжей, для млекопитающих называют *ULK1* (от англ. Unc-51-Like Kinase 1). Первый номер оправдан, так как *ATG1* и *ULK1* участвуют в инициации аутофагии, причем киназа способна активироваться протеинкиназой AMPK (от англ. Adenosine Monophosphate-Activated Protein Kinase), контролирующей энергетический баланс клетки, и ингибироваться серин-треониновой киназой mTOR (от англ. mammalian — млекопитающие и target of rapamycin — мишень рапамицина), которая играет центральную роль в контроле кле-

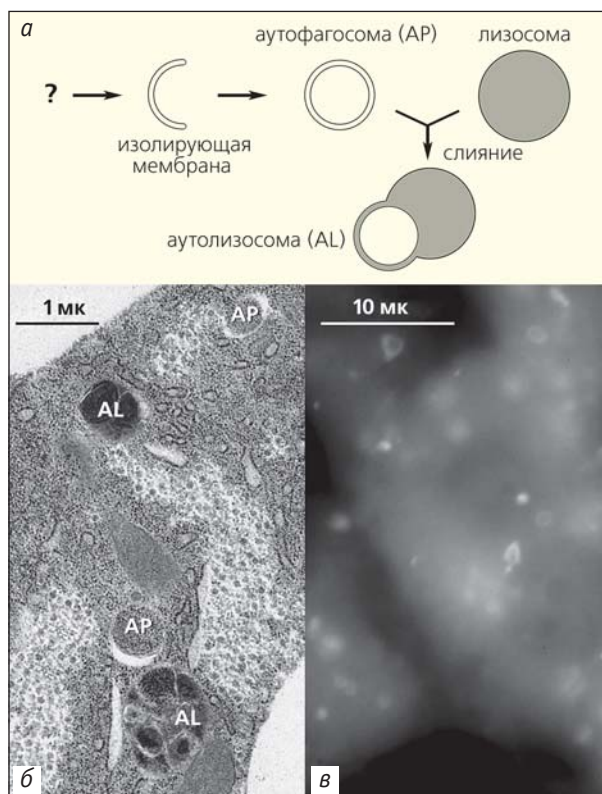


Схема образования аутофагосомы (а): изолирующая мембрана окружает клеточные структуры и создает аутофагосому, которая сливается с лизосомой и создает аутолизосому [5]. Электронные микрофотографии (б, в) аутофагосомных структур на разных стадиях деградации их содержимого в жировом теле личинки (функциональном аналоге печени млекопитающих) дрозофилы (б) и помеченных флуоресцентной меткой аутофагосом в клетках печени голодающей мыши (в).



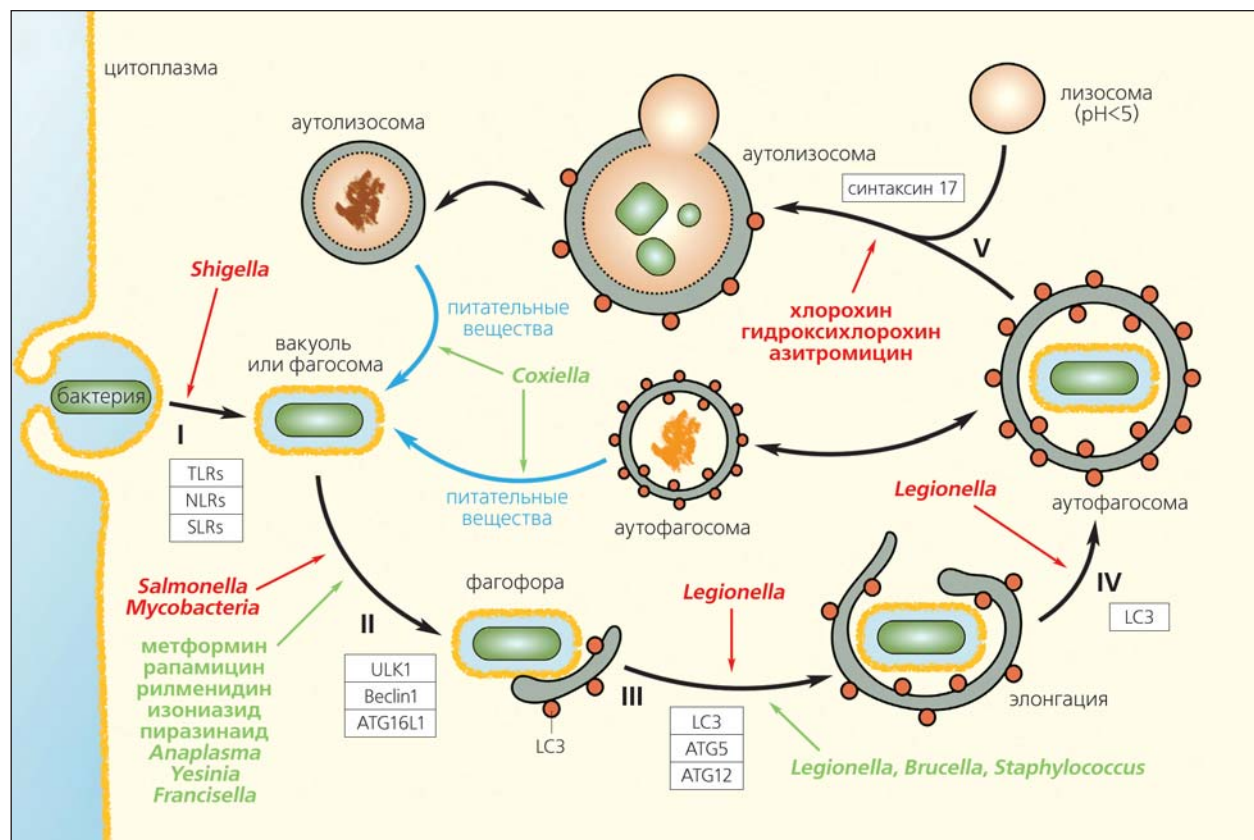


Схема способов модуляции аутофагии различными ингибиторами (лекарствами и внутриклеточными бактериями; на схеме выделены красным цветом) или активаторами (отмечены зеленым) [6]. Клеточные киназы-мишени и аутофагические белки, принимающие участие в определенных этапах аутофагии, указаны в белых прямоугольниках. Этапы аутофагии при попадании в клетку патогенных бактерий: I — проникшую в клетку бактерию опознают рецепторы (TLRs, NLRs, SLRs); II — белки ULK1, Beclin1 и ATG16L1 инициируют образование мембраны фагофоры, что приводит к поглощению бактерии; III — белки ATG5 и ATG12 связываются с ATG16L1, что помогает связыванию LC3, который наряду с другими факторами участвует в сборке, элонгации и окончательном формировании аутофагосомы; IV — мембраны из эндоплазматического ретикулума, аппарата Гольджи или плазматическая мембрана способствуют удлинению (элонгации) двойной оболочки фагофоры, для того чтобы сформировать аутофагосому; V — присоединение синтаксина 17 к мембране аутофагосомы индуцирует слияние с лизосомой, в результате чего аутофагосома созревает в аутофаголизосому, что обычно приводит к деградации бактериальной инфекции или других ненужных компонентов клетки. На всех стадиях созревания аутофагосомы и их слияния с лизосомами с образованием аутофаголизосом показано действие специфических лекарственных препаратов или внутриклеточных бактерий (обозначено курсивом). Различные этапы аутофагии, на которые оказывают влияние патогенные бактерии или соответствующие агенты (индукторы или активаторы аутофагии), показаны зелеными (активация) или красными стрелками (ингибирование). Синими стрелками отмечен поток питательных веществ, двусторонним — возможность того, что содержание клеточных аутофагосом и аутолизосом может быть перенаправлено в фагосому и использовано патогенными бактериями в качестве источника питательных веществ.

точного роста, биосинтезе белка и выживании. Таким образом, становится ясно, почему голодание активирует аутофагию, — при недостатке пищевых веществ подавляется активность mTOR, но активируется ATG-киназа и, как следствие, процесс аутофагии, которая, разрушая часть старых и поврежденных белков до аминокислот, позволяет клетке реутилизировать их и пережить голодание.

Интересна история изучения белка ATG8, который у растущих дрожжей равномерно распределен в клетке, но при голодании накапливается

в области мембран аутофагосом и аутофагических телец. Оказалось, что мембранная локализация ATG8 зависит от активности двух убиквитин-подобных конъюгационных систем, которые регулируют его ковалентное связывание с фосфатидилэтаноломином (PE) мембран. Связывание ATG8 с PE — важный этап слияния аутофагосомы с лизосомами, завершающийся образованием аутофаголизосом. Белок ATG8 в клетках млекопитающих известен как белок с другой номенклатурой — LC3 (от англ. Light Chain 3), и его широко используют в качестве маркера аутофагии.

В отличие от протеасомной деградации, аутофагия участвует в расщеплении не только долгоживущих белков, но и таких крупных органелл, как митохондрии, ядра, цитоплазматический ретикулум. В этом случае аутофагия называется селективной, в отличие от процесса, неизбирательно разрушающего клеточные белки. Тот факт, что аутофагия активируется в ответ на различные клеточные стрессы, свидетельствует о ее протективной функции, связанной с защитой от повреждений клетки и о правильной укладке белков (фолдинге).

К сожалению, протективную функцию аутофагии сполна используют раковые клетки для выживания в организме. Неслучайно в настоящее время аутофагия стала мишенью для поиска различных противоопухолевых препаратов, которые могли бы блокировать цитопротективную функцию аутофагии в раковых клетках и вызывать их гибель.

Пристальное внимание ученых привлекает изучение роли аутофагии в развитии нейрологических дефектов, связанных со старением человека. Из работ на модельных организмах (дрозофиле, нематоды) стало понятно, что у человека развитие нейродегенеративных болезней связано с дефектами аутофагии и накоплением дефектных белков. Так, у мышей блокирование аутофагии, вызванное тканеспецифической инактивацией генов *ATG5* и *ATG12*, приводит к нейродегенерации. При нейродегенеративных заболеваниях из-за нарушения аутофагии в нервных клетках накапливаются неправильно сложенные белки:  $\alpha$ -синуклеин — при болезни Паркинсона,  $\beta$ -амилоид — при болезни Альцгеймера и хантингтин — при хорее Гентингтона.

Аутофагия имеет большое значение для лечения возрастных болезней. В последние годы получено молекулярное обоснование феномена увеличения продолжительности жизни при ограничении потребления калорий с пищей (calorie restriction). Уменьшение поступления питательных веществ снижает активность mTOR, биогенез рибосом и синтез белка. В свою очередь, снижение активности mTOR активирует аутофагию, в том числе и очистку клеток от дефектных белков, что благоприятно сказывается на продолжи-

тельности жизни. Специфические ингибиторы одного из комплексов mTOR-mTORC1 (например, рапамицин) обладают аналогичным эффектом. Более того, выключение гена-мишени *mTORC1*, продуктом которого является киназа S6, ответственная за фосфорилирование одного из рибосомных белков и, соответственно, за синтез белка, продлевает жизнь мышей.

Все перечисленное показывает тонкое взаимодействие различных сигнальных путей в клетке и роль аутофагии в регуляции многих жизненных процессов. Сам Осуми, как он говорит, не ожидал, что его работа, которая поначалу не привлекала большого внимания, вызовет такой бурный рост исследований в этой области. Сейчас, на момент написания статьи, при поиске в базе данных NCBI PubMed на слово «аутофагия» открывается 26 430 работ.

Открытия, сделанные Осуми, действительно привели к возникновению новой парадигмы в нашем понимании того, как клетка рециклирует свое содержимое и какова роль аутофагии в таких физиологических процессах, как адаптация к голоданию или ответ на инфекции. Мутации генов аутофагии могут приводить к болезням, а процесс аутофагии прямо вовлечен в развитие раковых и нейрологических заболеваний. Именно поэтому работы профессора Осуми отмечены престижной научной премией и имеют не только чисто научное фундаментальное значение, но и большие перспективы для практического использования на благо человечества.

Во время пресс-конференции, которая состоялась через два часа после известия о присуждении Осуми награды, он подчеркнул важность фундаментальных исследований и признался: «В Нобелевской премии есть особенный вес. Об этом я мечтал с детства». В то же время его жена, присутствовавшая на пресс-конференции, сообщила, что ее супруг никогда не был амбициозным человеком, и она прежде всего испытывает удивление.

© В.А.Поспелов,

доктор биологических наук  
Институт цитологии РАН  
Санкт-Петербург

## Литература

1. Bachmair A., Finley D., Varshavsky A. In vivo half-life of a protein is a function of its amino-terminal residue // Science. 1986. V.234. P.179–186. Doi:10.1126/science.3018930.
2. Varshavsky A. The N-end rule pathway of protein degradation // Genes to Cells. 1997. V.2. P.13–28. Doi:10.1046/j.1365-2443.1997.1020301.
3. Takeshige K., Baba, M., Tsuboi S., Noda T., Ohsumi Y. Autophagy in yeast demonstrated with proteinase-deficient mutants and conditions for its induction // Journal of Cell Biology. 1992. V.119. P.301–311.
4. Tsukada M., Ohsumi Y. Isolation and characterization of autophagy-defective mutants of *Saccharomyces cerevisiae* // FEBS Letters. 1993. V.333. P.169–174.
5. Jurasz G., Neufeld T.P. Autophagy: A forty-year search for a missing membrane source // PLoS Biol. 2006. V.4. e36. Doi:10.1371/journal.pbio.0040036.
6. Escoll P., Rolando M., Buchrieser C. Modulation of host autophagy during bacterial infection: sabotaging host munitions for pathogen nutrition // Front. Immunol. 2016. V.7. Article 81. Doi:10.3389/fimmu.2016.00081.

## Астрофизика

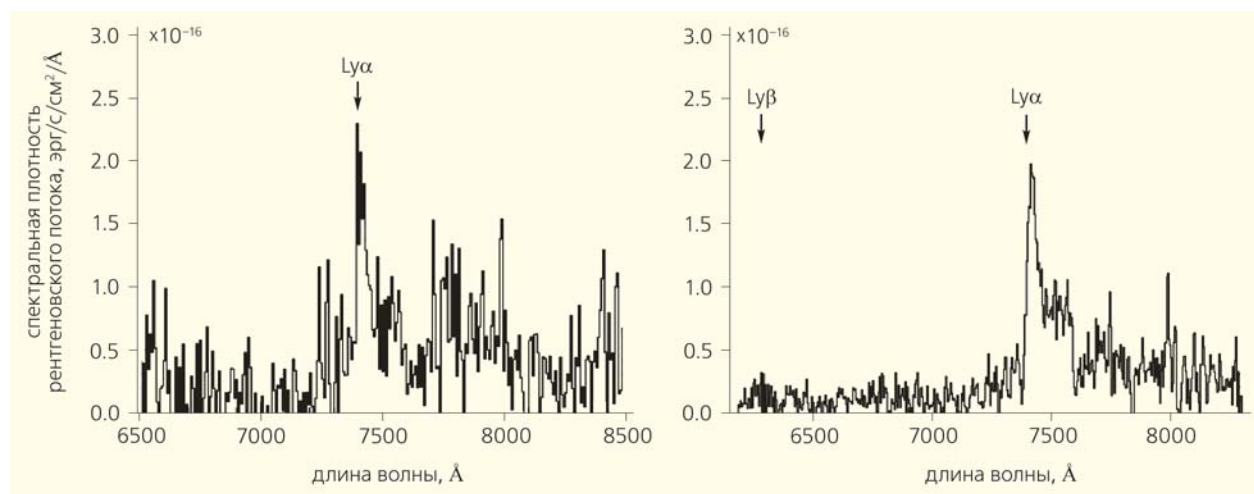
### Открытие далекого рентгеновского квазара

Ученые из отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований (ИКИ) РАН открыли один из наиболее далеких рентгеновских квазаров 3XMM J125329.4+305539. Измерение космологического красного смещения (сдвига спектральных линий источника в сторону красной, длинноволновой, части), которое характеризует расстояние до излучающего объекта ( $z = 5.08$ ), показало, что его свет возник, когда возраст Вселенной составлял приблизительно 1.2 млрд лет (сейчас — около 14 млрд лет).

Поиск и изучение далеких квазаров — черных дыр массой в несколько миллиардов солнц в центре галактики, затягивающих в свою гравитационную яму окружающий межзвездный газ, — представляют большой интерес для науки. Эти ярчайшие объекты ранней Вселенной, по-видимому, сыграли важную роль в эпоху реионизации (период между 500 и 1000 млн лет после Большого взрыва), когда образовывались первые звезды и галактики, скопления и сверхскопления галактик. Падающее на черную дыру вещество образу-

ет аккреционный диск, в котором возникает мощное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение. Его можно регистрировать наземными и космическими телескопами с огромных космологических расстояний. Подсчеты и детальные исследования квазаров позволяют проследить историю роста сверхмассивных черных дыр и формирования первых галактик в ранней Вселенной. Особенно интересно излучение, регистрируемое в рентгеновском диапазоне, так как оно связано с физическими процессами, которые идут в непосредственной близости от сверхмассивной черной дыры.

Далекие рентгеновские квазары — довольно редкие объекты. На данный момент известно лишь несколько десятков источников на красных смещениях  $z > 5$  с измеренным рентгеновским потоком. 3XMM J125329.4+305539 был обнаружен в ходе работ по поиску квазаров на больших красных смещениях ( $z > 3$ ) среди рентгеновских источников из каталога космической обсерватории XMM-Ньютон (X-ray Multi-Mirror Mission — рентгеновская многозеркальная миссия, Европейское космическое агентство) — самого обширного собрания рентгеновских источников на потоках выше  $5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> (этой чувствительности достаточно для поиска наиболее ярких квазаров



Спектры квазара 3XMM J125329.4+305539 на красном смещении  $z = 5.08$ : измеренный спектрографом АДАМ (слева) и БТА (справа). Пик, обозначенный стрелкой, — полоса излучения водорода, так называемая линия Лайман-альфа. В лабораторных условиях она находится в ультрафиолетовой области спектра, но из-за большого удаления объекта и красного смещения сдвинулась в видимую часть спектра.



в рентгене). Чтобы среди сотен тысяч таких источников выделить далекие квазары, были привлечены данные SDSS (Sloan Digital Sky Survey — Слоановского цифрового обзора неба) и WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer — Инфракрасного обзора неба). С их помощью удалось провести классификацию рентгеновских источников и отобрать 903 наиболее вероятных кандидата в квазары на  $z > 3$ . Основная часть выборки — хорошо известные, спектроскопически подтвержденные квазары. Однако нашлось более 350 новых кандидатов, для которых были сделаны грубые оценки расстояния по имеющимся фотометрическим данным (оптическим и инфракрасным цветам). Два десятка из них прошли спектроскопическую проверку с помощью 1.6-метрового телескопа АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (г.Иркутск) и 6-метрового Большого телескопа азимутального (БТА) Специальной астрофизической лаборатории (САО) РАН (пос.Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика). Результаты этих наблюдений подтвердили правильность прогноза для большинства кандидатов. Один из объектов как раз и оказался квазаром на красном смещении  $z = 5.08$ .

Расстояние до объекта определено по положению эмиссионных линий в спектре источника, полученных на новом спектрографе низкого и среднего разрешения АДАМ. Его разработали в САО РАН по заказу Института космических исследований и установили на телескопе АЗТ-33ИК для решения задач наземной оптической поддержки будущего рентгеновского обзора всего неба международной астрофизической обсерваторией «Спектр-Рентген-Гамма», создаваемой российскими учеными при участии германских коллег (ее запуск ожидается в 2018 г.).

Обычно квазары исследуют с помощью 6–10-метровых телескопов. Однако благодаря конструктивным особенностям нового спектрографа (высокой прозрачности оптики и хорошей чувствительности матрицы в инфракрасной области) на 1.6-метровом телескопе удалось получить спектр очень слабого объекта (21 видимая звездная величина), по которому и был определен тип источника и расстояние до него. Наблюдения на БТА подтвердили этот результат. 3XMM J125329.4+305539 стал четвертым отобранном в рентгене квазаром в каталоге ХММ-Ньютон, обнаруженным на  $z > 5$ , и вторым по удаленности от нас (самый далекий открытый в рентгене квазар обзора ХММ-Ньютон находится чуть дальше, на  $z > 5.1$ ).

В рамках этой работы были найдены и более близкие источники. Ее результаты показывают, что уже сейчас, используя накопленные данные, можно значительно увеличить число известных рентгеновских квазаров. Предполагается, что в ходе обзора всего неба обсерватории «Спектр-Рентген-Гамма» удастся открыть свыше 3 млн ква-

заров и галактик с активными ядрами. Из них несколько сотен могут оказаться такими же и более далекими, чем квазар, обнаруженный астрофизиками ИКИ РАН.

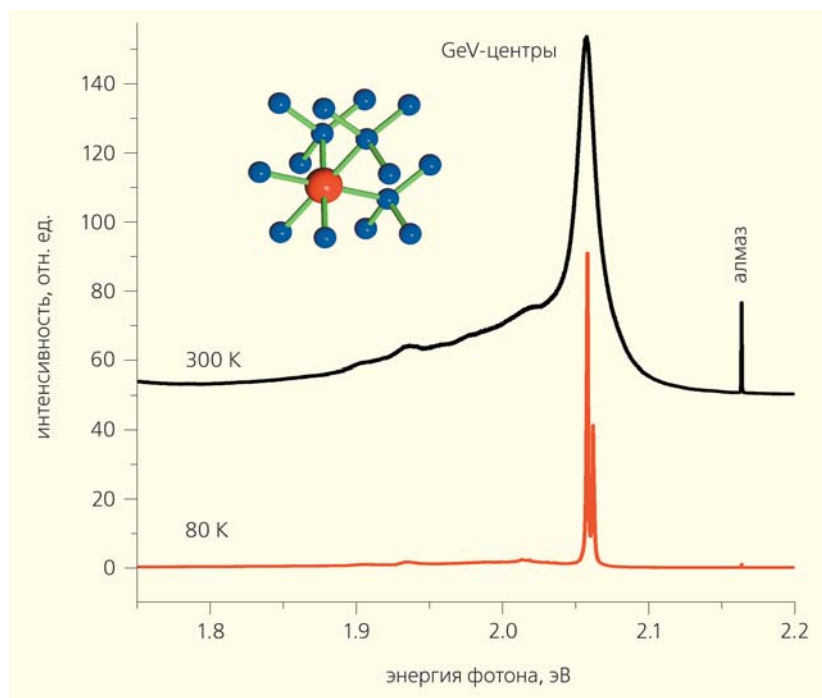
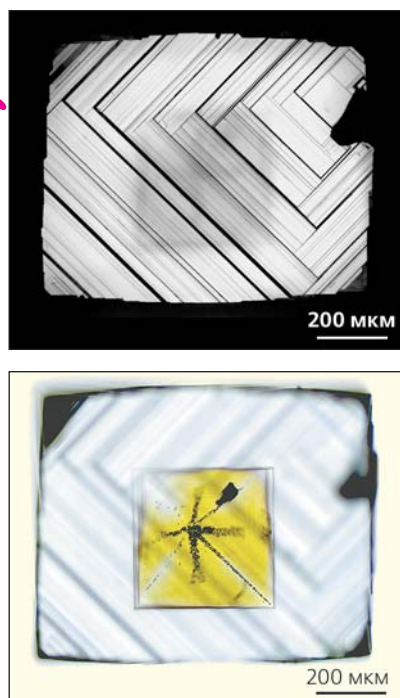
© Г.А.Хорунжев,  
Р.А.Буренин, М.В.Еселевич,  
кандидаты физико-математических наук  
С.Ю.Сазонов,  
доктор физико-математических наук  
Институт космических исследований РАН  
Москва

## Кристаллография

### Германий в решетке алмаза

История изучения кристаллов алмаза насчитывает многие десятилетия. До недавнего времени этот редкий в природе минерал, обладающий высочайшей твердостью и уникальными геммологическими характеристиками, применялся главным образом в обрабатывающей промышленности и ювелирном деле. Но сегодня, по мнению экспертов, основные перспективы его использования связаны с высокотехнологичными областями науки и техники, в частности с микроэлектроникой. Многие уникальные физические свойства алмаза определяются дефектно-примесными центрами — дефектами решетки, созданными атомом постороннего элемента. В решетку алмаза могут встраиваться азот, бор, фосфор, водород, никель, кобальт и кремний. Например, примесь бора позволяет получать голубые алмазы с проводимостью  $p$ -типа, а примесь фосфора — алмазы с  $n$ -типом проводимости. При высоких концентрациях бора алмаз становится сверхпроводником с критической температурой в диапазоне 4–11 К.

Особую актуальность исследования примесных центров в алмазе приобрели в последнее десятилетие, когда были сделаны важные шаги в развитии стратегического направления науки, связанного с созданием вычислительных устройств, которые действуют на квантовомеханических принципах, — так называемых квантовых компьютеров. Одной из перспективных платформ для разработки физических основ таких устройств стали оптические центры в алмазе. Одиночные дефектно-примесные центры рассматриваются как возможный вариант реализации базовых элементов для квантовых операций, получивших название «квантовые биты» или «кубиты». Специалистам удалось показать перспективность ряда оптических центров в алмазе, связанных с примесью азота (NV-центры) и кремния (SiV-центры). Продолжается поиск новых дефектно-примесных центров в алмазе, которые по своим характеристикам будут превосходить уже изученные. В прошлом году семейство примесных центров пополнилось германием. Результаты исследований новосибирских ученых и международной японско-



Кристаллы алмаза, легированные германием и содержащие GeV-центры: слева — изображения в проходящем (вверху) и отраженном свете; справа — спектры фотолюминесценции.

германской группы в этой области были опубликованы почти одновременно в одном из журналов группы «Nature» — «Scientific Reports»\*. Параллель-

\* Palyanov YN, Kupriyanov IN, Borzdov YM, Survtsev N.V. Germanium: a new catalyst for diamond synthesis and a new optically active impurity in diamond // Scientific Reports. 2015. V.5. P.14789; Iwasaki T, Isibashi F, Miyamoto Y. et al. Germanium-vacancy single color centers in diamond // Scientific Reports. 2015. V.5. P.12882.

но работавшие над проблемой специалисты Физического института имени П.Н.Лебедева РАН и Института общей физики имени А.М.Прохорова РАН (Москва) представили свои результаты в журнале «Краткие сообщения по физике»\*\*. Все три группы показали принципиальную возможность вхождения примеси германия в решетку алмаза и обозначили перспективы германий-вакансионных центров для квантовых технологий.

Для решения квантово-физических задач нужны кристаллы высокого качества размером хотя бы 1–2 мм. Попытки вырастить алмазы, легированные германием, в хорошо изученных системах на основе железа, никеля и кобальта успехом не увенчались. Германий категорически отказался встраиваться в структуру алмаза в этих условиях. Эксперименты новосибирских ученых оказались успешными при использовании расплава магния в качестве растворителя-катализатора синтеза алмаза. Детальные исследования по росту крис-



Беспрессовые аппараты высокого давления «Разрезная сфера».

\*\* Ральченко ВГ, Седов ВС, Хамич АА и др. Наблюдение центра окраски Ge-вакансия в микрокристаллических алмазных пленках // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. Т.42. №6. С.15–19.

таллов алмаза, легированных германием, в системе Mg–Ge–C недавно опубликованы в высокорейтинговом журнале Американского химического общества «Crystal Growth & Design»\*. Эксперименты проходили на беспрессовой аппаратуре высокого давления «Разрезная сфера» (БАРС), разработанной в Институте геологии и минералогии имени В.С.Соболева (г.Новосибирск).

Условия синтеза алмаза достаточно экстремальны: температура 1700–1900°C, давление 70 тыс. атм. При этих параметрах кристаллы алмаза растут из раствора углерода в расплаве магния с необычно высокой скоростью, достигающей 6–8 мм/ч. Они очень оригинальны — кристаллизуются в форме кубов, а не октаэдров, наиболее типичных для природных и синтетических алмазов. Спектроскопические исследования подтвердили вхождение атомов германия в кристаллическую решетку синтезированных алмазов и формирование германий-вакансионных (GeV) оптических центров. Установлено, что концентрация GeV-центров зависит от температуры синтеза и механизма кристаллизации (спонтанной нуклеации или роста на затравочных кристаллах), а сами кристаллы характеризуются достаточно высоким структурным совершенством. Полученные результаты открывают новые возможности для исследования свойств германий-вакансионных центров — их ансамблей и одиночных состояний.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-27-00054).

© Ю.Н.Пальянов,

доктор геолого-минералогических наук  
Институт геологии и минералогии  
имени В.С.Соболева  
г.Новосибирск

## Палеонтология

### В урочище Волчья Грива обнаружена самая высокая в Азии концентрация костей мамонтов

Самую высокую в Азии концентрацию костей мамонтов обнаружили палеонтологи Томского государственного университета, работавшие на раскопках 2015–2016 гг. в урочище Волчья Грива. Эта 10–15-метровая возвышенность в Каргатском районе Новосибирской обл. протяженностью около 8 км и шириной в 0.5–1 км хорошо известна специалистам. В 1957 г. здесь впервые нашли кости нескольких мамонтов, лошадей и бизона. Дальнейшее широкомасштабное изучение местонахождения (в 1967, 1968, 1975 и 1991 гг.) было нацелено в основном на выяснение роли палеоли-

тического человека в образовании мамонтовых «кладбищ». В ходе его удалось установить, что 18–11 тыс. лет назад в этой части Западной Сибири существовал не только самый южный (на сегодняшний день), но и один из самых молодых в Евразии мамонтовых рефугиумов. Сейчас Волчья Грива имеет статус памятника природы регионального значения.

Новейшие палеонтолого-стратиграфические и геархеологические исследования, возобновленные на Волчьей Гриве после долгого перерыва, направлены на комплексное изучение позднелепистоценовых и голоценовых биогеоценозов юга Западной Сибири, особенно биотических и абиотических связей мамонтовой фауны, включая палеолитического человека. В 2015 г. на площади 12 м<sup>2</sup> было обнаружено более 600 (!) остатков шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799)\*\*. Но сезон 2016 г. преподнес новый сюрприз: на площади всего 9 м<sup>2</sup>, расположенной в 700 м от предыдущих мест раскопок, кроме обычного для Волчьей Гривы костеносного уровня — примерно в 0.8–1.3 м от поверхности — был обнаружен более глубокий, о существовании которого никто не подозревал. Его выявили благодаря негласному правилу: прокапывать подстилающие отложения минимум на полметра после отбора нижних находок. В результате на глубине от 1.6 до 2.14 м были обнаружены позвонки, ребра, кости конечностей детенышей и взрослых мамонтов с высочайшей степенью концентрации: местами свыше 130 остатков на 1 м<sup>2</sup> при мощности костеносных отложений до полуметра.

Кости из нижнего уровня имеют хорошую сохранность: они были законсервированы песчано-глинистыми осадками в небольшой западине (глубиной примерно 0.5 м) спустя несколько лет после смерти животных. Среди самых крупных находок — бедро длиной почти 1.15 м, вероятно, принадлежавшее самцу возрастом 45–50 лет. При росте более трех метров он весил 5–6 т. Важно отметить, что в этом уровне обнаружено относительно много анатомически сочлененных костей, которые помогут получить детальную информацию о причинах гибели животных, их возрасте, размерах и др. Всего же в раскопе 2016 г. найдено 785 ископаемых остатков, почти все они принадлежат мамонтам и лишь немногие — бизону, лошади, хищникам и грызунам.

Необходимо указать, что кости из нижнего уровня в целом значительно больше, чем кости, принадлежавшие особям близкого индивидуального возраста из вышележащих отложений. То есть древние мамонты были явно крупнее, чем их более молодые (в геологическом отношении) родственники. На костях мамонтов всех уровней зафиксиро-

\* Palyanov YN, Kupriyanov IN, Borzdov YM. et al. High-pressure synthesis and characterization of Ge-doped single crystal diamond // Crystal Growth & Design. 2016. V.16. P.3510–3518.

\*\* Лецинский С.В., Зенин В.Н., Бурканова Е.М. и др. Комплексные исследования Барабинского мамонтового рефугиума в 2015 г. // Вест. Том. гос. ун-та. 2015. №400. С.354–365.





Костеносный горизонт Волчьей Гривы в раскопе 2016 г.: вверху — верхняя часть среднего уровня (остатки не менее двух мамонтов, анатомические сочленения позвонков, костей кисти и др.); в середине — верхняя часть нижнего уровня (остатки не менее трех мамонтов, анатомические сочленения позвонков, кости с погрызами и др.); внизу — средняя часть нижнего уровня (остатки не менее двух мамонтов, анатомические сочленения позвонков, подъязычные кости и др.).

рованы патологические изменения, типичные для остеодистрофии, которая часто развивается в условиях недостатка в среде обитания жизненно необходимых макро- и микроэлементов. Хроническое минеральное голодание в конце плейстоцена, вызвавшее геохимический стресс, обуславливало непреодолимое стремление крупных травоядных к миграциям на зверовые солонцы\*. Там они могли употреблять отложения, поверхностные и грунтовые воды, богатые дефицитными элементами. Поэтому во время сартанского похолодания (примерно 24–10 тыс. лет назад) литофагия (камнеедение) была главной причиной посещения Волчьей Гривы животными мамонтовой фауны. В пике минерального дефицита из-за благоприятного геохимического ландшафта она становилась своеобразным оазисом — очагом активности мамонтов и других млекопитающих, включая человека. Периодическое массовое скопление (десятки, возможно, сотни особей во время миграций, гона и периода лактации) животных, их относительно высокая смертность и благоприятные условия захоронения на отдельных участках рельефа способствовали формированию мощного костеносного горизонта.

Концентрация остатков *M. primigenius* в урочище Волчья Грива — самая высокая из известных в Азии для данного вида, ее можно сравнить только с аллювиальным местонахождением Берелёх (Северная Якутия), где на некоторых участках фиксировалось до 50 находок на один кубический метр. Очевидно, что локальная концентрация костей в субаэральных условиях Волчьей Гривы изначально была намного выше, так как максимальное выветривание, хищники и падальщики уничтожили большое количество останков животных (особенно мамонят). Тем не ме-

\* Лецинский С.В. Геохимический стресс как причина вымирания мамонтов // Природа. 2016. №4. С.88–90.

нее предварительные результаты раскопок Волчьей Гривы в 2015–2016 гг. подтверждают ранее сделанный вывод о большой доле неполовозрелых мамонтов в западносибирских местонахождениях сартанского возраста.

Роль палеолитического населения в накоплении костеносного горизонта Волчьей Гривы представляется незначительной. В процессе раскопок обнаружены лишь редкие каменные артефакты, тогда как свидетельства охоты и достоверные следы разделки туш отсутствуют. Поэтому с уверенностью можно сказать только то, что человек использовал остатки мамонтов, павших от болезней, травм, хищников и прочих причин, в процессе жизнедеятельности. Этот вывод подтверждает мнение исследователей о том, что Волчья Грива — место естественной гибели мамонтов, освоенное палеолитическим человеком.

© С.В.Лещинский,

доктор геолого-минералогических наук  
Томский государственный университет

## Археология

### Первые на Шелковом пути

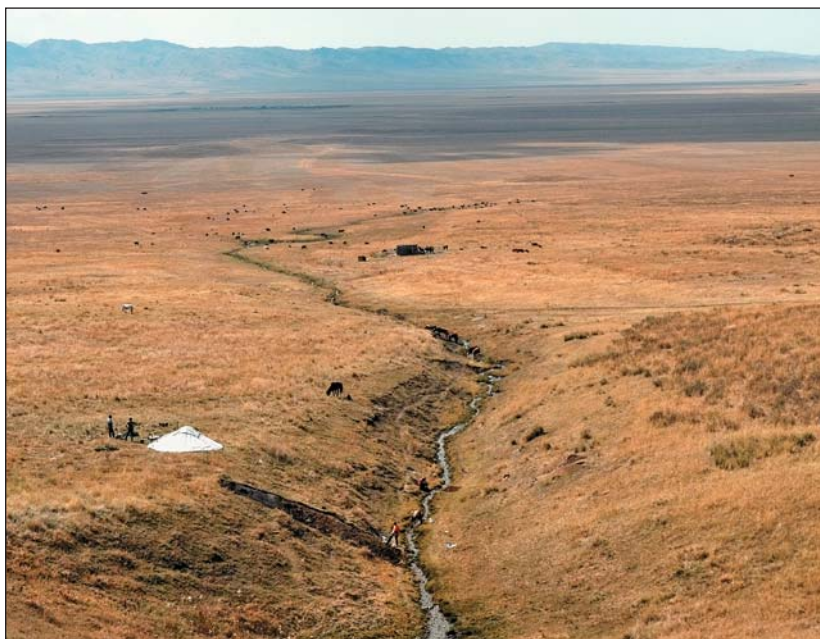
В 2015–2016 гг. ученые из Института археологии и этнографии СО РАН (г. Новосибирск) и Национального музея Республики Казахстан проводили совместные экспедиционные работы на территории Северного и Восточного Казахстана с целью обнаружить новые памятники эпохи палеолита. Общая протяженность разведочных маршрутов составила около 15 тыс. км. За два года археологи выявили более 20 неизвестных ранее местонахождений каменного века, в основном нестратифицированные памятники с разрушенным культурным слоем, где артефакты залегали прямо на поверхности. Главная находка экспедиции была сделана в конце полевого сезона 2016 г., когда в Зайсанском районе Восточно-Казахстанской области открыли многослойную стоянку Ушбулак-1 («Три ручья» в переводе с казахского) с материалами разных этапов верхнего палеолита, включая ранний (45–35 тыс. лет назад), который характеризуется переходом от среднепалеолитических (мустьерских) индустрий к более совершенным технологиям обработки камня и связан со становлением культуры человека современного физического типа и его расселением по территории Евразии. Памятники конца среднего — начала верх-

него палеолита хорошо изучены в Европе, странах восточной части Средиземного моря, Средней Азии, Монголии и на Алтае. Однако этот период на территории Казахстана до сегодняшнего дня оставался одним из наименее исследованных, так как стратифицированные памятники того времени были здесь неизвестны. Шульбинка, единственная близкая по хронологии стоянка, до сих пор до конца не изучена и сейчас скрыта водами Шульбинского водохранилища.

Ушбулак-1 находится на северо-востоке Шиликтинской долины, недалеко от Джунгарских ворот — проходов между горами Джунгарского Алатау\*. Эти естественные коридоры с древнейших времен использовали кочевые племена, шедшие из Средней Азии на территорию современного Северного Китая и Монголии, а в более позднее время здесь проходило одно из ответвлений Шелкового пути. Стоянка расположена у небольшого ручья, который бьет из-под скального останца, ограниченного с двух сторон логами. Массовый археологический материал был найден на стометровом отрезке ручья, начиная от истока. Каменные изделия залегали в большом количестве прямо в русле. В ходе сбора подъемного материала и последующих шурфовочных работ получена обширная коллекция артефактов (около 2 тыс. предметов). Кроме того, обнаружены остатки двух представителей плейстоценовой фауны — архара и кулана.

Основные раскопки проходили на левом, более высоком, борту ручья. Здесь удалось заложить

\* Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: структура и динамика развития // Природа. 2014. №9. С.48–59.



Общий вид стоянки Ушбулак-1.

Фото В.М.Харевича





Каменные артефакты палеолитического времени на дне ручья.

Фото Ж.К.Таймагомбетова



Археологический материал в слое 6 в одном из разведочных шурфов.

Фото В.М.Харевича

траншею метровой ширины протяженностью примерно 8 м, ориентированную перпендикулярно склону и пройденную несколькими ступенями на глубину до 6 м от верхней точки (при этом нижняя граница вскрытых отложений находилась на 0.5 м ниже уровня воды). На полученном разрезе выделено семь геологических слоев, в шести из которых был зафиксирован археологический материал. Всего на участке обнаружено более 600 каменных артефактов. По их составу и характеристикам, стратиграфической позиции, а также

по сопровождающим остаткам фауны предварительно выделено три основных культурно-хронологических комплекса: голоценовый (слой 1), верхнепалеолитический (слои 2–4) и начальной поры верхнего палеолита (слои 6–7). Присутствие в материалах нижнего комплекса (в наиболее ранних слоях) нескольких специфических типов каменных изделий (нуклеусы с противоположащими ударными площадками для крупных пластин, нуклеусы-резцы, многочисленные реберчатые и «занырывающие» технические сколы, концевые скребки на крупных пластинах, усеченные пластины и остроконечник с черешком) позволяет отнести стоянку к началу верхнего палеолита.

Каменное производство в те времена было направлено на изготовление именно пластин (более 70% от сколов), зачастую крупных (до 20 см длиной). Из них же изготовлено большинство орудий. По набору типов орудий эта индустрия соответствует стратифицированным комплексам начала верхнего палеолита, найденным на территории Южной Сибири (Кара-Бом и др.), Северной Монголии (Толбор-4 и др.), а также материалам из Северного Китая (Джунгария, Ордос). Занимая промежуточное географическое положение, Ушбулак позволяет объединить эти индустрии в единый макрорегион, где проходило становление популяции человека современного антропологического типа и вытеснение ею неандертальского населения. В целом материал из слоев 6–7 соответствует стоянке-мастерской на выходах качественного каменного сырья,

которая располагалась в береговой зоне пресноводного палеозера. В последующие периоды верхнего палеолита, вплоть до голоценового времени, это место неоднократно посещал древний человек, однако объем хозяйственной деятельности и продолжительность заселения были существенно меньше.

© А.А.Аношкин,

кандидат исторических наук

Институт археологии и этнографии СО РАН

г.Новосибирск



# Причастны ли охотники к сокращению биоразнообразия?

В.И.Приходько,

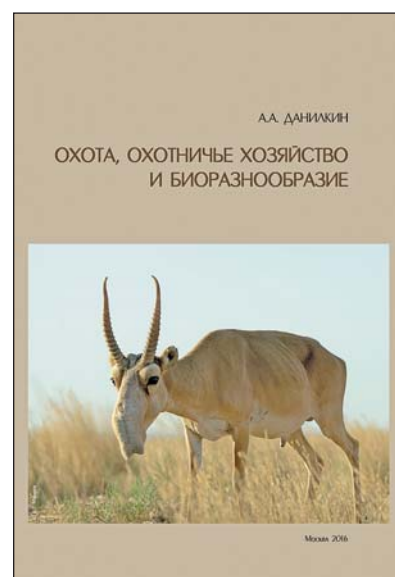
кандидат биологических наук

Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН  
Москва

Утрата любого вида или группы видов, подвида или даже популяции приводит к ослаблению определенного звена в экосистеме, к сокращению биологических ресурсов и приближает нас к крушению самой системы. Утраченные виды и их генофонд восстановить практически невозможно. Но каковы основные причины вымирания видов и сокращения биоразнообразия — природные катаклизмы, изменение среды обитания или антропогенный фактор, охота в частности? Могут ли охотники истребить или поставить на грань исчезновения виды, насчитывающие миллионы, тысячи или всего лишь сотни особей? Как сохранить биоразнообразие в наше время? И как существенно увеличить ресурсы промысловых животных? Ответы на эти и другие остро дискуссионные вопросы содержатся в книге известного специалиста по диким копытным, доктора биологических наук, профессора Алексея Алексеевича Данилкина.

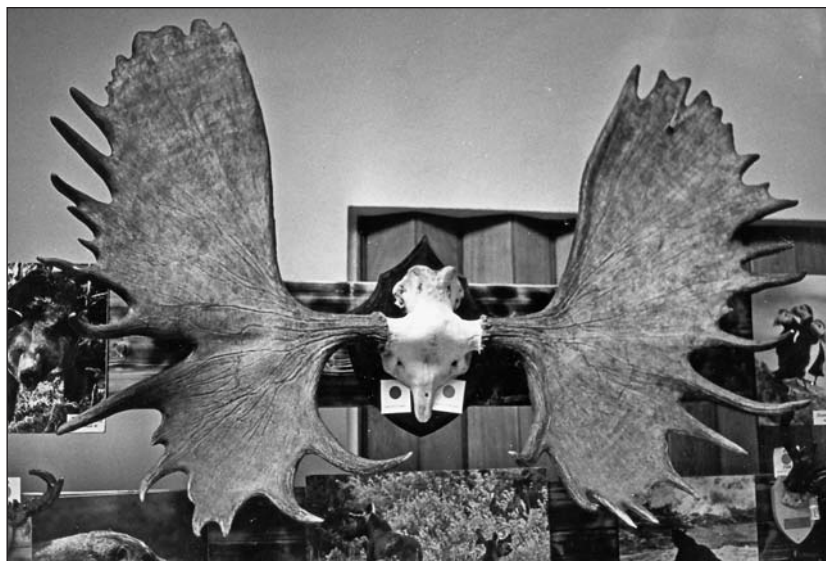
Напомню, что долгое время в среде специалистов доминировала так называемая климатическая теория динамики природных популяций, в которой ведущую роль отводили факторам окружающей среды. На ее основе позднее возникла трофоклиматическая, или трофическая, гипотеза, в рамках которой приводились доказательства влияния растительности на рост или снижение численности животных. Приверженцы биоценотического направления увязывали популяционные циклы с сукцессиями или рассматривали взаимодействия потребителей растительной массы как частный случай в системе «хищник—жертва». В результате таких взаимоотношений трофические ресурсы регулируют популяции потребителей, при этом растительная биомасса, в свою очередь, находится под их контролем.

По мнению Данилкина, трофоклиматические факторы, безусловно, играют существенную роль в динамике населения охотничьих видов. Однако важнейший фактор регуляции — не изменения продуктивности фитоценозов и не сукцессии растительности, а охотничье воздействие на природные популяции. Только за исторический период на планете исчезли 120 видов крупных млекопитающих, служащих объектами охоты, и 150 видов птиц. Видовое разнообразие особенно быстро уменьшалось среди обитателей степных и лесостепных зон. Средняя скорость вымирания животных под воздействием антропогенного фактора неуклонно растет. Если в период с позднего палеолита до железного века темпы истребления млекопитающих человеком за тысячелетие не превышали 0.7 вида, то со Средневековья до современности они возрастали от 4.4 до 20 видов. И этот негативный процесс продолжается. В середине XX в., например, вряд ли кто-либо из специалистов мог предположить, что сайга, численность которой удалось восстановить до нескольких миллионов особей, в начале XXI в. снова станет видом, находящимся на грани вымирания, что во многих областях европейской части России трудно будет найти след лося, что зайцев



**А.А.Данилкин. ОХОТА, ОХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО И БИОРАЗНООБРАЗИЕ.**

М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 250 с.



Гонка за призовыми охотничьими трофеями стимулирует изъятие из популяций репродуктивного ядра.

Фото А.Ф.Дигилевича

станет почти столь же мало, как и копытных. Никто не мог и представить, что власть имущие станут расстреливать редких животных с вертолетов, что в заповедниках и заказниках будут проводить коммерческие охоты, что спасать амурского тигра, дальневосточного леопарда и снежного барса придется всем миром при личном участии Президента России. Все эти факты приведены в книге, и автор обоснованно высказывает опасения, что при ухудшении экономической ситуации список исчезающих видов может пополниться.

Неоценима заслуга автора в следующем. Он еще в начале 1990-х годов обратил внимание на проблему катастрофического снижения численности основных видов диких копытных в России и в книге «Динамика населения диких копытных России: гипотезы, факторы, закономерности» (2009) убедительно показал тесную связь деградации природных популяций с архаичным ведением отечественного охотничьего хозяйства, с планомерным истреблением репродуктивного ядра видов и с процветанием нелегальной охоты. Алексей Алексеевич аргументировано развеял трофоклиматическую гипотезу динамики населения копытных, принятую на «вооружение» Департаментом по охране и развитию охотничьих ресурсов Минсельхоза России и его территориальными органами. В рецензируемой монографии приведены новые веские аргументы и факты.

Среди факторов, определяющих современную динамику населения большинства промысловых видов, как полагает Данилкин, доминирует браконьерство в сочетании с прессом крупных хищников. Незаконный промысел как широко распространенное социальное явление стал в последнюю четверть века определяющим негатив-

ным фактором снижения биологического разнообразия. Из приведенных в книге данных следует, что даже в некоторых заповедниках доля животных (например, кабарги), которая исчезает из-за браконьеров, достигает 50%. Далеко не полная официальная статистика свидетельствует, что лишь в 1999–2005 гг. в совокупности в России было зарегистрировано 99 тыс. незаконно добытых животных, из них 15 тыс. — копытные. Наряду с коррупцией браконьерство, следовательно, приобрело характер национального бедствия.

В России в последние десятилетия быстро развивается трофейная охота. Из сугубо элитарного занятия она превращается в массовое и самостоятельное охотничье направление. Меня-

ется и идеология охоты. Если раньше охотник стремился добыть зверя ради мяса или шкуры (пушнины), то теперь мощнейшим стимулом для многих из них становится трофей. Однако стремительная переориентация охотничьего направления при отсутствии необходимой нормативно-правовой базы, традиций и культуры трофейной охоты, специально подготовленных квалифицированных егерей и охотоведов и при низкой самодисциплине охотников порождает новые проблемы. Главная из них — повсеместное уничтожение элитных зверей с самыми мощными рогами, клыками, черепами. При низкой численности диких копытных и некоторых видов хищников возникает реальная угроза их генофонду, прогрессирует качественная деградация популяций.

Выводы, сделанные автором после анализа сложившейся ситуации, неутешительны. Охрана животного мира в России по-прежнему неудовлетворительна. Использование ресурсов крайне неэффективно. Многие охотничьи виды находятся в депрессивном состоянии. Редкие виды (в той или иной степени находящиеся под угрозой исчезновения), за небольшим исключением, не восстановлены после векового периода охраны. Государственная политика и управление в сфере охоты оставляет желать лучшего. А охота была, есть и, видимо, еще долго будет одной из основных угроз биоразнообразию.

Охота — аттавизм, доставшийся нам в наследство от древнего человека-охотника, неистребимая страсть, пагубная для животного мира, или необходимость? Дискуссии на эту тему очень остры, особенно в социальных сетях. Противники охоты, пропагандирующие абсолютную защиту животных, надо отдать им должное, постепенно завое-

вывают все новые плацдармы, и у них для этого есть веские основания. Однако нельзя не заметить и другую тенденцию. В последнее столетие во многих странах мира охотники стали прогрессивной природоохранной силой, сохраняющей биоразнообразие, оптимизирующей ресурсы промысловых животных и вносящей к тому же немалый вклад в экономику государств.

Государственные и общественные охотничьи организации и охотники России, как считает автор, тоже сделали немало для сохранения и восстановления животного мира (ярчайшие примеры — восстановление популяций соболя и бобра) и даже обогатили отечественную фауну, акклиматизировав некоторые виды. Но при этом неосознанно были созданы новые угрозы биоразнообразию, в том числе генетические и инвазионные.

Данилкин анализирует последствия акклиматизации и реакклиматизации животных. Мировая практика показала, что внедрение чуждых видов нередко превращалось в бедствие для местных форм и биотеннозов в целом. Вряд ли стоит преувеличивать степень успешности акклиматизации и реакклиматизации животных и в России. Негативные последствия их искусственного расселения очевидны. Автор приводит широкий перечень таких последствий, среди которых стоит указать на изменение генофонда автохтонных видов, усиление межвидовой конкуренции, приводящей к вытеснению местных видов вселенцами, а также распространение паразитов и болезней. Акклиматизационные мероприятия в итоге не привели к ожидаемому увеличению поголовья и восстановлению ареалов многих расселяемых видов. Несмотря на допущенные ошибки при акклиматизации, бессистемное расселение животных продолжается. На государственном уровне осуществляется «депопуляция» (уничтожение) кабана и запланирована замена этого вида на чужеродного белохвостого оленя. Стоит особо отметить, что Алексей Алексеевич занимает четкую позицию о недопустимости акклиматизации на территории России белохвостого оленя как конкурента для всех аборигенных форм оленей. К тому же замещение местных видов на чужеродные противоречит международным обязательствам России, в частности «Конвенции о биологическом разнообразии» (принята на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 5 июня 1992 г., ратифицирована Российской Федерацией 17 февраля 1995 г. и вступила в силу для России 4 июля 1995 г.).



Чиновники планируют истребить на территории России кабана — как переносчика инфекционных заболеваний домашних свиней.

Фото А.Ф.Дигилевича

В специальной охотничьей литературе нередки споры о целесообразности дичеразведения, фермерского охотничьего хозяйства в частности. Охотничье фермерство, по мнению автора, — прогрессивное направление охотничьей деятельности, прежде всего в силу экономической рентабельности. Вольерное разведение позволяет вовлечь в хозяйственный оборот животных, которые не могут быть одомашнены из-за экологических и поведенческих особенностей. Таким образом, в быстро развивающейся области зоокультуры имеется обширное поле для практической работы.

Книга завершается большим разделом, в котором дан анализ государственной политики и управления в сфере охотничьего хозяйства России. Автор сконцентрировал свое внимание главным образом на анализе правовых и нормативных документов, регулирующих управление и надзор охотничьей деятельности, а также государственной стратегии и программ развития охотничьего хозяйства и сохранения биоразнообразия. Этот раздел книги изобилует цитатами коллег и правоведов с критикой результатов структурных преобразований в использовании животного мира. Данилкин подчеркивает, что охота, охотничье хозяйство и биоразнообразие — звенья одной цепи: охота существенно влияет на биоразнообразие, а без него и ресурсной основы не может быть охоты. Охота была, есть и в обозримом будущем останется одной из основных угроз существованию промысловых видов, но она может быть и фактором сохранения животного мира при правильной организации охотничьего хозяйства. К сожалению, эта форма человеческой деятельности в России далека не только от совершенства, но и от здравого смысла.





Численность северного оленя на Сахалине из-за браконьерства неуклонно снижается.

Фото В.И.Приходько

Алексей Алексеевич указывает на целый ряд недостатков в системе управления охотничьим хозяйством, некогда важной отрасли народного хозяйства. Система государственного управления в сфере охотничьего хозяйства и сохранения биоразнообразия в России в постсоветский период складывалась хаотично. Из государственной структуры выпал управляющий и организующий орган, каким был в советское время Наркомат земледелия, а затем Главное управление охотничьего хозяйства и заповедников при Совете министров РСФСР. Профессионализм надзирающих федеральных охотничьих чиновников оставляет желать лучшего. Состояние законодательства и институтов охотничьего хозяйства в целом не соответствует принципам устойчивого охотопользования, выработанным международным сообществом на основе экосистемного подхода. Долгожданный Федеральный закон №209-ФЗ «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 24 июля 2009 г. оказался антиохотничьим и лишь усугубил негативную ситуацию в охотничьем хозяйстве и государственном управлении биологическими ресурсами. Охотопользователи и охотники оказались бесправными. Лучшие охотничьи угодья и находящиеся в них животные, как отмечает автор, фактически продаются (легально и нелегально по хорошо отработанной коррупционной схеме) и на законных основаниях приватизированы группой ловких и богатых граждан. Доступ охотникам в частные владения, площадь которых измеряется десятками и сотнями тысяч гектаров (!), как при феодализме, закрыт или обставлен непомерными поборами. При этом некоторые хозяева частных охотничьих угодий, почувствовав полную вседозволенность и безнаказанность, добывают дичь в любое время года. Так в де-

мократическом государстве появилась привилегированная каста и в охотничьей сфере деятельности. Конституционное право всех граждан страны — равное право на охоту — попорно! Вопиющая социальная несправедливость в доступе к охотничьим ресурсам приводит к росту протестного браконьерства, которое государство остановить не в силах. Следовательно, эффективная охрана, воспроизводство, увеличение численности и рациональное использование промысловых животных и гарантированное сохранение биоразнообразия при существующем законе «Об охоте...» и сложившейся системной организации охотничьего хозяйства, по мнению Данилкина, невозможны.

Автор считает, что многократное увеличение необходимых человеку биологических ресурсов, в том числе путем фермерского диче- и рыборазведения, неистощительное их использование, сохранение биоразнообразия, а также социальная справедливость в использовании природных ресурсов должны стать одними из главных экономических, социальных и природоохранных целей общества и государства в ближайшие десятилетия. Однако достичь этого результата без кардинальной реформы во всей сфере биологического ресурсопользования нереально.

Но какой должна быть реформа, какой путь развития отечественного охотничьего хозяйства необходимо выбрать? Это непростая задача. Автор анализирует различные варианты и предлагает оптимальные пути решения.

Подчеркну, что монография Данилкина, без преувеличения, представляет собой фундаментальный труд, основанный на многолетних собственных исследованиях в разных регионах России, на анализе огромного количества публикаций и официальных данных. Весь материал автор донес до читателя, как всегда, максимально кратко, доступно и аргументировано. Эти аргументы и факты, безусловно, помогут охотоведам и охотникам осознать свою сопричастность к планетарной идее сохранения биоразнообразия и, возможно, подвигнут чиновников на необходимые реформы, хотя верится в это с трудом. Ценность монографии и в том, что она вводит читателя в мир современных, нередко дискуссионных и противоречивых представлений о справедливости и охотничьих традициях, попираемых на начальном, деструктивном, этапе развития капитализма. Книга предназначена для широкого круга специалистов и, наверняка, найдет в нашей стране немало читателей. ■

## Физиология. Медицина

С. Сингх, Э. Эрнст. НИ КОШЕЛЬКА, НИ ЖИЗНИ / Пер. с англ. М.: Издательство АСТ, CORPUS, 2017. 512 с.

Книга известного британского популяризатора науки Саймона Сингха и профессора Экстерского университета Эдзарда Эрнста посвящена нетрадиционной медицине и предназначена для широкого круга читателей, однако ее также можно рекомендовать в качестве учебника для студентов медицинских и биологических факультетов высших учебных заведений.

Саймон Сингх — обладатель ученой степени по физике элементарных частиц. Свою карьеру начинал как продюсер научно-популярных программ телеканала BBC. Автор мировых бестселлеров «Великая теорема Ферма», «Книга шифров», «Big Bang» (книга о Большом взрыве, которая еще не издавалась на русском языке). В 2012 году основал некоммерческую организацию «Good Thinking Society», цель которой — «вдохновлять пытливые умы и поддерживать рациональные исследования», поощряя научный скептицизм.

Эдзард Эрнст — первый в мире профессор комплементарной медицины. Начинал как врач-клиницист, затем изучал и практиковал гомеопатию и многие другие нетрадиционные методы лечения. Сейчас профессор Эрнст — всемирно признанный специалист по научной проверке методов нетрадиционной медицины, регулярно выступает на радио и телевидении.

Опираясь на результаты многочисленных научных исследований, в книге «Ни кошелька, ни жизни» авторы раскрывают неутешительную правду о нетрадиционной медицине. Они разбираются, какие из ее методов действенны и безвредны, а какие бесполезны и опасны, анализируют, почему во всем мире так широко распространены методы лечения, не доказавшие своей эффективности, а главное, отвечают не только на извечный вопрос «Кто виноват?», но и на вопрос «Что делать?».

Сначала авторы разъясняют, что представляет собой научный метод и как ученые на основании наблюдений и экспериментов определяют, насколько действенны те или иные способы лечения. Затем научный подход последовательно применяется к акупунктуре (иглоукаливанию), гомеопатии, хиропрактике и траволечению — четырем самым известным и наиболее исследованным отраслям нетрадиционной медицины. Краткий обзор остальных ее методов (свыше тридцати) дан в приложении. В каждом случае обсуждается, каково происхождение метода, в чем его суть и насколько он эффективен и безопасен. В конце книги авторы подводят некоторые итоги на основании данных, представленных в предыдущих главах, и рассуждают о будущем здравоохранения. Если найдены неоспоримые доказательства, что тот или иной метод нетрадиционной медицины не помогает справиться с болезнями, следует ли его запретить — или главной движущей силой должен оставаться выбор больного? Напротив, если какие-то нетрадиционные методы и в самом деле помогают в лечении, нельзя ли их внедрить в классическую медицину — или же между профессиональным врачебным сообществом и специалистами по нетрадиционной медицине сохранится непримиримая вражда?

Итак, кто же прав: критики, считающие методы нетрадиционной медицины своего рода шаманством и мошенничеством, или матери, доверяющие им здоровье своих детей?

Книга издана при поддержке просветительского фонда «Эволюция». Уже переведена на немецкий, итальянский, сербский, нидерландский, венгерский, шведский, японский и другие языки.



## Палеонтология

**С.В.Наугольных.** FLORA PERMICA. РАСТИТЕЛЬНЫЙ МИР ПЕРМСКОГО ПЕРИОДА. ПРИУРАЛЬЕ.  
М.: Геос, 2016. 336 с. (Труды Геологического института РАН. Вып.612).

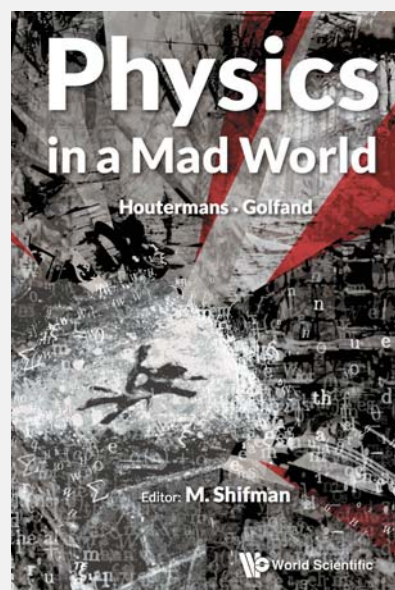


Монография посвящена пермской (298.9–252.17 млн лет назад) флоре Среднего и Южного Приуралья (западной части древнего материка Ангарида) с привлечением данных из соседних регионов (Печорского Приуралья, а также центральных районов Ангарида). Приведены сведения о местонахождениях растительных остатков с послойным описанием наиболее важных разрезов (Таежное-1, Чекарда-1) и списками растительных остатков. Подробно рассмотрена история изучения позднепалеозойских растений России с акцентом на Приуралье. Большая часть книги посвящена описанию ископаемых растений. Охарактеризованы все основные группы высших растений, остатки которых встречаются в пермских отложениях Приуралья (плауновидные, клинолистники, каламитовые, хвощевидные, папоротники, птеридоспермы, гинкгофиты, войновские и хвойные). Ряд форм описан впервые. Сведения о морфологии растений, о географическом и стратиграфическом распространении видов и родов сопровождаются рисунками и фототаблицами, позволяющими сопоставить найденные ископаемые остатки со строением различных органов растений, в первую очередь — листьев, а также репродуктивных органов и семян. В завершающей главе рассмотрены палеоэкологические реконструкции пермских флор Приуралья.

## История науки. Физика

PHYSICS IN A MAD WORLD: HOUTERMANS, GOLFAND / Ed. M.Shifman. Singapore: World Scientific, 2015. 540 p.

XX век потрясли великие социальные катаклизмы и кровавые войны. В 1920–1930 гг. радикальная революция произошла в физике: квантовая теория изменила представления о мире. В 1970-х квантовая теория поля пережила новое рождение в связи с открытием принципа суперсимметрии. Сборник, подготовленный известным российским физиком М.А.Шифманом (ныне профессором Университета Миннесоты), посвящен двум ученым — Фридриху Георгу (Фрицу) Хоутермансу и Юрию Абрамовичу Гольфанду. Хоутерманс в 1929 г. (совместно с Р.Аткинсоном) провел первые расчеты звездных термоядерных реакций. После прихода к власти нацистов переехал из Германии в СССР, где работал в Харьковском физико-техническом институте. В 1937-м был арестован в Москве, а в мае 1940 г. выдан гестапо и помещен в тюрьму в Берлине. Гольфанд в 1971 г. написал работу, в которой впервые рассматривалась идея суперсимметрии как принцип построения теории элементарных частиц. Но в 1973 г. он был уволен из Физического института имени П.Н.Лебедева АН СССР «за непродуктивность исследований». Он решил эмигрировать в Израиль, но получил отказ под предлогом секретности его работ двадцатилетней давности. В 1980 г. был восстановлен в Физическом институте, в 1989 г. ему (совместно с Е.П.Лихтманом) присуждена премия имени И.Е.Тамма за цикл работ по суперсимметрии. В октябре 1990 г. Гольфанд с семьей выехал в Израиль. В книге собраны документальные материалы и воспоминания о жизни ученых, подготовленные их друзьями, коллегами и последователями.

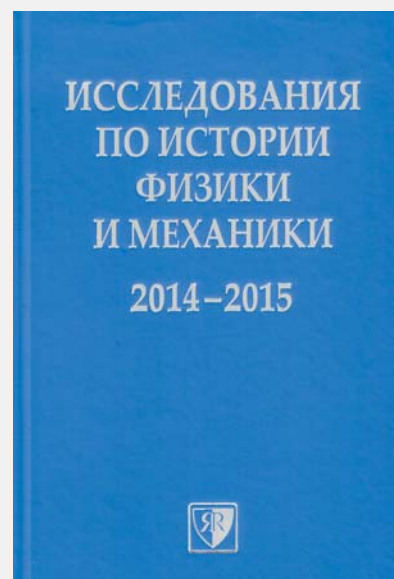




## История науки. Физика. Механика

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСТОРИИ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ. 2014–2015 / Отв. ред. В.П.Визгин.  
М.: Янус-К, 2016. 508 с.

Очередной ежегодный сборник выпущен Институтом истории естествознания и техники (ИИЕТ) имени С.И.Вавилова РАН. Его первый раздел «Исследования, воспоминания, размышления» составляют материалы, посвященные юбилеям известных ученых: 100-летию одного из крупнейших наших физиков-теоретиков академика Е.М.Лившица (статья А.С.Сониной); 150-летию знаменитого российского кристаллографа Г.В.Вульфа (статья Г.Е.Горелика); 85-летию создателя Физико-технологического института РАН академика К.А.Валиева (статья А.А.Кокина и А.А.Орликовского). В разделе «Некоторые главы отечественной истории науки» опубликовано продолжение исследований эпохи философских дискуссий в физике (статья А.А.Сониной), а также материалы, посвященные: биографии С.И.Вавилова и первым десяти годам истории теоретического отдела ФИАН (статьи Б.М.Болотовского); «темным местам» в истории публикаций трудов И.Ньютона в России и загадкам пропавших переводов (статья А.Г.Ваганова); концептуальным спорам о статусе теории относительности в России и за рубежом (статья Г.Б.Малыкина). Большая подборка статей вынесена в раздел «Научные школы». Ее открывает работа В.П.Визгина и А.В.Кессениха «Научные школы в истории отечественной физики». В статье Е.И.Погребысской показано, как С.И.Вавилов создавал свою оптическую школу люминесценции. Прослежена история создания двух научных школ в Московском университете: гравитационной школы Д.Д.Иваненко (статья В.П.Визгина) и теоретической школы ядерной физики в НИИЯФ (статья А.В.Кессениха). Как возникла и развивалась школа теоретической и математической физики Н.Н.Богомолова, показано в работах А.М.Корзухиной (дубнинский период) и Ю.Г.Рудого (существование школы в целом). Также рассмотрены история развития отечественной радиоастрономии (статья В.В.Кудрявцева) и формирования кристаллофизической школы академика А.В.Шубникова (статья А.С.Сониной). Раздел «Избранные вопросы истории физики» объединяет публикации, относящиеся к различным вопросам физики, не связанным напрямую с отечественной историей. В него вошел анализ того, как складывались взаимоотношения двух нобелевских лауреатов — А.Эйнштейна и Ф.Ленарда (статья Е.М.Берковича). Далее следует исторический обзор К.Н.Мухина, посвященный истории изучения нейтрино. Завершают раздел две публикации, связанные с оптикой. В первой из них рассказано о том, как взаимодействуют оптический прибор и человеческий глаз при создании изображения, для чего Р.Е.Ильинский перевел с латыни одну из глав трехтомного сочинения Л.Эйлера «Dioptricae...». Статья Д.В.Фомичева посвящена тому, как различные оптические инструменты способствуют правильному построению образа в живописи. Завершает сборник небольшой очерк Н.В.Вдовиченко, А.В.Кессениха и Н.С.Коновалова памяти С.В.Русакова, работника ФИАН, который долгие годы сотрудничал с ИИЕТ РАН и публиковал исторические исследования своего отца — В.П.Русакова, профессора кафедры физики Смоленского университета.



# Информация 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. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию материалы можно

прислать по электронной почте. Текст статьи, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате doc, txt или rtf. Иллюстрации предоставляются отдельными файлами. Принимаются векторные и растровые изображения в форматах EPS или TIFF (без LZW-компрессии). Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (Bitmap) — не менее 800 dpi. Векторные изображения должны быть выполнены в программе CorelDRAW или Adobe Illustrator.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала. См.: [www.ras.ru/publishing/nature.aspx](http://www.ras.ru/publishing/nature.aspx); [www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/](http://www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/)

## ПРИРОДА

Ответственный секретарь  
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Литературный редактор  
**Е.Е.ЖУКОВА**

Научные редакторы  
**М.Б.БУРЗИН**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

**М.Е.ХАЛИЗЕВА**

**О.И.ШУТОВА**

**А.О.ЯКИМЕНКО**

Художественный редактор  
**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией  
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Перевод  
**А.О.ЯКИМЕНКО**

Графика, верстка:  
**С.В.УСКОВ**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

Учредитель:  
Президиум Российской академии наук

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

Адрес редакции: 117997,  
Москва, ул.Профсоюзная, 90 (к.417)  
Тел.: (495) 276-70-36 (доб. 4171, 4172)  
E-mail: [priroda@naukaran.com](mailto:priroda@naukaran.com)

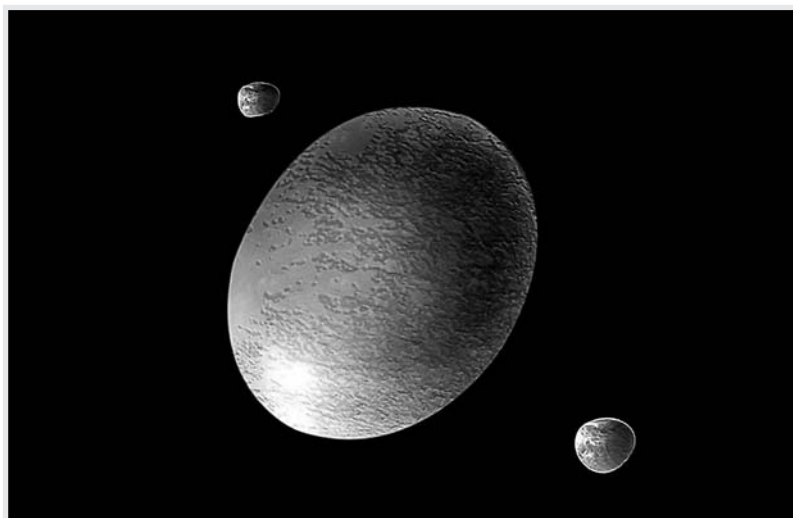
Подписано в печать 22.12.2016  
Формат 60×88 1/8  
Бумага офсетная. Офсетная печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Тираж 310 экз.  
Заказ 1010  
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Издательство «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



О космических телах, населяющих пояс Койпера, которым с 1992 г. обозначают на небесной карте область Солнечной системы за орбитой Нептуна в пределах 30–50 а.е. от нашего светила, мы почти ничего не знали еще лет двадцать назад. Старый знакомец Плутон был разжалован недавно из обычных планет в карликовые неслучайно: с совершенствованием средств наблюдения стало ясно, что в тех краях по своим удаленным орбитам медленно движутся многочисленные каменно-ледяные астероиды и планетоиды. Сегодня их известно более двух с половиной тысяч, и сбор информации продолжается, ведь она напрямую затрагивает важные вопросы происхождения планет. Один из самых интересных объектов пояса Койпера — карликовая планета Хаумеа, лишь немного меньшая Плутона и имеющая два спутника. При своих солидных размерах она вращается вокруг своей оси очень быстро — быстрее всех тел Солнечной системы, больших 100 км в поперечнике. Почему это так и как образовалась пара спутников планеты? Существующая гипотеза импакта, согласно которой спутники откололись в результате столкновения с другим астероидом, остается умозрительной, не опирается на расчеты и не дает объяснения ряду наблюдающихся фактов. Этих недостатков лишена гравитирующая неоднородная модель Хаумеа, представляющая планету плотным каменным ядром с толстой ледяной оболочкой. Анализ модели методами теории потенциала и теории неоднородных фигур равновесия позволяет ответить на многие вопросы.

**Б.П.Кондратьев.**

УНИКАЛЬНОЕ ТРИО: КАРЛИКОВАЯ ПЛАНЕТА ХАУМЕА И ЕЕ СПУТНИКИ



